

**РОСЖЕЛДОР**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего профессионального образования**  
**«Ростовский государственный университет путей сообщения»**  
**(ФГБОУ ВПО РГУПС)**

---

Н.А. Трубицина

**РАСЧЕТ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Учебное пособие

Ростов-на-Дону  
2012

УДК 621.313.223

**Трубицина, Н.А.**

Расчет двигателя постоянного тока : учеб. пособие / Н.А. Трубицина ; ФГБОУ ВПО РГУПС. – Ростов н/Д, 2012. – 44 с. – Библиогр.: 5 назв.

Содержатся сведения о двигателях постоянного тока. Приведен расчет основных параметров двигателя параллельного возбуждения, характеристик намагничивания и рабочих характеристик машины. Также произведен тепловой и вентиляционный расчет машины.

Учебное пособие предназначено для студентов очного отделения, обучающихся по специальности «Электромеханика».

Рекомендовано к изданию кафедрой «Электрические машины и аппараты» РГУПС.

Рецензенты: канд. техн. наук, доц. Н.К. Колесников (МГАВТ);  
канд. техн. наук, доц. А.С. Шапшал (ФГБОУ ВПО РГУПС)

## Введение

Двигатели постоянного тока (ДПТ) исторически были первыми устройствами, преобразующими электрическую энергию в механическую. В настоящее время они применяются в различных отраслях промышленности.

Значительное распространение электродвигателей постоянного тока объясняется их ценными качествами: высокими пусковым, тормозным и перегрузочными моментами, сравнительно высоким быстродействием, что важно при реверсировании и торможении, возможностью широкого и плавного регулирования частоты вращения [1].

Электродвигатели постоянного тока используют для регулируемых приводов различных станков и механизмов. Мощности этих электродвигателей достигают сотен киловатт.

В связи с автоматизацией управления производственными процессами и механизмами расширяется область применения маломощных двигателей постоянного тока общего назначения мощностью от единиц до сотен ватт.

Электродвигатели постоянного тока составляют значительную часть электрооборудования летательных аппаратов. Электродвигатели летательных аппаратов используют для привода различных механизмов; мощность их имеет значительный диапазон – от долей до десятков киловатт. Двигатели постоянного тока широко используются в электрической тяге, в приводе подъемных устройств и металлорежущих станков. Мощные двигатели постоянного тока применяются для привода прокатных станов и на судах для вращения гребных винтов. На железнодорожном транспорте широко используются тяговые электродвигатели, предназначенные для приведения локомотива в движение. Они устанавливаются непосредственно на тележках около колесных пар и работают в очень неблагоприятных условиях (при движении локомотива на них попадает вода, снег, пыль и т. п.) [2].

Постоянный ток для питания двигателей получается с помощью генераторов постоянного тока или выпрямительных установок, преобразующих переменный ток в постоянный.

В зависимости от способов возбуждения ДПТ разделяются на несколько типов (с независимым, параллельным, последовательным и смешанным возбуждением).

В данном учебном пособии приводится пример расчета ДПТ параллельного возбуждения при отсутствии компенсационной обмотки со следующими параметрами [1]:

номинальный режим работы – продолжительный ( $S1$ );

номинальная отдаваемая мощность –  $P_{2н} = 5,5$  кВт;

номинальное напряжение –  $U_n = 220$  В;

номинальная частота вращения –  $n_n = 1500$  об/мин;

предел регулирования частоты вращения вверх от номинальной ослаблением поля главных полюсов –  $n_{max} = 3000$  об/мин;

предел регулирования частоты вращения вниз от номинальной изменением напряжения на якоре –  $n_{min} = 500$  об/мин;

кратковременная перегрузка по току –  $I_{\max}/I_n = 1,5$ ;  
род возбуждения – параллельное со стабилизирующей последовательной обмоткой;

источник и условия питания – тиристорные преобразователи с коэффициентом пульсации не более 1,1;

степень защиты от внешних воздействий – IP44;

способ охлаждения – IC0141;

исполнение по способу монтажа – IM1001;

климатические условия и категория размещения – У4;

форма выступающего конца вала – цилиндрическая;

способ соединения с приводным механизмом – упругая муфта.

Для чертежей продольного и поперечного сечений проектируемого двигателя, а также для построения различных характеристик, используются данные, полученные при расчете машины.

Расчет может быть выполнен полностью или частично в программе *MathCAD* или *Excel*, а чертежи построены в программе *AutoCAD*, КОМПАС или же *Visio*. Можно использовать и другие имеющиеся компьютерные программы для расчетов и чертежей.

## 1 ГЛАВНЫЕ РАЗМЕРЫ

1.1 Высота оси вращения [3, табл. 10-1]:

$$h = 160 \text{ мм.}$$

1.2 Максимально допустимый наружный диаметр корпуса  $D_{\text{корп}}$ , мм:

$$D_{\text{корп}} = 2(h - h_1), \quad (1)$$

где  $h_1 = 6$  мм – минимально допустимое расстояние от нижней части корпуса машины до опорной плоскости лап [3, рис. 1-3];

$$D_{\text{корп}} = 2(160 - 6) = 308 \text{ мм.}$$

1.3 Максимально допустимый наружный диаметр сердечника статора:

$$D_{H1} = D_{\text{корп}} = 308 \text{ мм.}$$

1.4 Наружный диаметр сердечника якоря [3, рис. 10-1 и табл. 10-3]:

$$D_{H2} = 160 \text{ мм.}$$

1.5 Коэффициент по напряжению [3, рис. 10-2, б]:

$$k_H = 0,915.$$

1.6 Коэффициент по току [3, рис. 10-3, б]:

$$k_T = 0,978.$$

1.7 Предварительное значение коэффициента полезного действия (КПД) [3, рис. 10-4]:

$$\eta = 0,82.$$

1.8 Расчётная мощность  $P'$ , Вт:

$$P' = E_2 I_2 = k_H U k_T = \frac{k_H k_T P_2}{\eta}, \quad (2)$$
$$P' = \frac{0,915 \cdot 0,978 \cdot 5500}{0,82} = 6002 \text{ Вт.}$$

Принимаем изоляцию класса нагревостойкости  $F$ .

1.9 Предварительное значение линейной нагрузки [3, рис. 10-5,  $a$ , табл. 10-4 и табл. 10-5]:

$$A'_2 = 165 \text{ А/см.}$$

1.10 Предварительное значение электромагнитной индукции в воздушном зазоре [3, рис. 10-5,  $b$ , табл. 10-4 и табл. 10-5]:

$$B'_\delta = 0,615 \text{ Тл.}$$

1.11 Расчётный коэффициент полюсной дуги [3, рис. 10-6]:

$$\alpha' = 0,62.$$

1.12 Расчётная длина сердечника якоря  $l'_2$ , мм:

$$l'_2 = \frac{6,1 \cdot 10^7 \cdot P'}{D_{H2}^2 \cdot n \cdot A_2 \cdot B_\delta \cdot \alpha'}, \quad (3)$$
$$l'_2 = \frac{6,1 \cdot 10^7 \cdot 6002}{160^2 \cdot 1500 \cdot 165 \cdot 0,615 \cdot 0,62} = 152 \text{ мм.}$$

1.13 Отношение расчётной длины сердечника якоря ДПТ к наружному диаметру сердечника якоря:

$$\lambda = \frac{l'_2}{D_{H2}}; \quad (4)$$
$$\lambda = \frac{152}{160} = 0,95.$$

1.14 Принятое максимальное значение [3, рис. 10-7]:

$$\lambda_{\max} = 1,34.$$

## 2 СЕРДЕЧНИК ЯКОРЯ

Принимаем для сердечника якоря сталь марки 2013 с толщиной листов 0,5 мм; листы сердечника якоря лакированные; форма пазов полузакрытая овальная; род обмотки – двухслойная насыпная; скос пазов на  $\frac{1}{2}$  зубцового деления.

2.1 Коэффициент заполнения сердечника якоря сталью:

$$k_c = 0,95.$$

2.2 Припуск на сборку сердечника по ширине паза [3, табл. 10-6]:

$$b_c = 0,2 \text{ мм.}$$

2.3 Конструктивная длина сердечника якоря:

$$l_2 = l'_2 = 155 \text{ мм.}$$

2.4 Эффективная длина сердечника якоря при отсутствии радиальных каналов  $l_{\phi 2}$ , мм:

$$l_{\phi 2} = k_c \cdot l_2, \quad (5)$$
$$l_{\phi 2} = 0,95 \cdot 155 = 147,2 \text{ мм.}$$

2.5 Предварительное значение внутреннего диаметра якоря [3, рис. 10-10]:

$$D_2 = 50 \text{ мм.}$$

### 3 СЕРДЕЧНИК ГЛАВНЫХ ПОЛЮСОВ

Принимаем для сердечников главных полюсов сталь марки 3411 с толщиной листов 1 мм; листы сердечников полюсов неизолированные; компенсационная обмотка не требуется; вид воздушного зазора между главными полюсами эксцентричный.

3.1 Коэффициент заполнения сердечника сталью:

$$k_c = 0,98.$$

3.2 Количество главных полюсов:

$$2p = 4.$$

3.3 Величина воздушного зазора [3, рис. 10-13]:

$$\delta = 1,6 \text{ мм.}$$

3.4 Высота зазора у оси  $\delta'$ , мм [3, рис. 10-11]:

$$\delta' = \frac{\delta}{1,5}, \quad (6)$$

$$\delta' = \frac{1,6}{1,5} = 1,07 \text{ мм.}$$

3.5 Высота зазора у края полюса  $\delta''$ , мм [3, рис. 10-11]:

$$\delta'' = 2\delta, \quad (7)$$

$$\delta'' = 2\delta = 2 \cdot 1,6 = 3,2 \text{ мм.}$$

3.6 Длина сердечника полюса:

$$l_n = l_2 = 155 \text{ мм.}$$

3.7 Полюсное деление  $\tau$ , мм:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_{H2}}{2p}, \quad (8)$$

$$\tau = \frac{3,14 \cdot 160}{4} = 125,6 \text{ мм.}$$

3.8 Расчётная ширина полюсной дуги  $b'_{nn}$ , мм:

$$b'_{nn} = \alpha' \cdot \tau, \quad (9)$$

$$b'_{nn} = 0,62 \cdot 125,6 = 77,9 \text{ мм.}$$

3.9 Действительная ширина полюсной дуги у некомпенсированной машины с эксцентричным зазором:

$$b_{nn} = b'_{nn} = 78 \text{ мм.}$$

3.10 Предварительная магнитная индукция в сердечнике полюса:

$$B'_n = 1,45 \text{ Тл.}$$

3.11 Предварительное значение магнитного потока в воздушном зазоре  $\Phi'$ , Вб:

$$\begin{aligned} \Phi' &= B'_\delta \cdot b_{nn} \cdot l'_2 \cdot 10^{-6}, \\ \Phi' &= 0,615 \cdot 77,9 \cdot 155 \cdot 10^{-6} = 7,43 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.} \end{aligned} \quad (10)$$

3.12 Эффективная длина сердечника полюса  $l_{\text{эф.н}}$ , мм:

$$\begin{aligned} l_{\text{эф.н}} &= k_c \cdot l_n, \\ l_{\text{эф.н}} &= 0,98 \cdot 155 = 151,9 \text{ мм.} \end{aligned} \quad (11)$$

3.13 Ширина сердечника полюса  $b_n$ , мм:

$$b_n = \frac{\sigma \cdot \Phi' \cdot 10^6}{l_{\text{эф.н}} \cdot B'_n}, \quad (12)$$

где  $\sigma = 1,2$  – коэффициент магнитного рассеяния главных полюсов [4];

$$b_n = \frac{1,2 \cdot 7,43 \cdot 10^3}{155 \cdot 1,45} = 40 \text{ мм.}$$

3.14 Ширина уступа полюса, предназначенная для упора обмотки возбуждения при её креплении:

$$b'_n = 0,1 \cdot b_n = 4 \text{ мм.} \quad (13)$$

3.15 Высота наконечника полюса  $h'_{nn}$ , мм:

$$\begin{aligned} h'_{nn} &= \frac{(b_{nn} - b_n) \cdot B'_\delta}{1,67 \cdot B'_n}, \\ h'_{nn} &= \frac{(77,9 - 40) \cdot 0,615}{1,67 \cdot 1,45} = 9,63 \text{ мм.} \end{aligned} \quad (14)$$

## 4 СЕРДЕЧНИКИ ДОБАВОЧНЫХ ПОЛЮСОВ

Принимаем для сердечников добавочных полюсов сталь марки 3411 толщиной 1 мм, листы сердечников полюсов не изолированные.

4.1 Коэффициент заполнения сердечника сталью:

$$k_c = 0,98.$$

4.2 Число добавочных полюсов:

$$2p_D = 4.$$

4.3 Длина наконечника добавочного полюса:

$$l_{nD} = l_2 = 155 \text{ мм.}$$

4.4 Длина наконечника добавочного полюса с учетом выступов:

$$l_d = 155 - 2 \cdot 5 = 145 \text{ мм.}$$

4.5 Предварительное значение ширины сердечника добавочного полюса [3, рис. 10-15]:

$$b'_d = 19 \text{ мм.}$$

4.6 Величина воздушного зазора [3, рис. 10-16]:

$$\delta'_d = 3,3 \text{ мм.}$$

## 5 СТАНИНА

Принимаем монолитную станину из стали марки Ст 3.

5.1 Длина станины  $l_1$ , мм:

$$l_1 = l_2 + 0,65\tau, \quad (15)$$
$$l_1 = 155 + 0,65 \cdot 125,6 = 235 \text{ мм.}$$

5.2 Предварительная магнитная индукция в станине:

$$B'_{C1} = 1,15 \text{ Тл.}$$

5.3 Высота станины  $h_{C1}$ , мм:

$$h_{C1} = \frac{\sigma \cdot \Phi' \cdot 10^6}{2 \cdot k_c \cdot l_1 \cdot B'_{C1}}, \quad (16)$$

где  $k_c = 1$  – коэффициент заполнения сталью [5];

$$h_{C1} = \frac{1,2 \cdot 7,43 \cdot 10^3}{2 \cdot 1 \cdot 235 \cdot 1,15} = 17 \text{ мм.}$$

5.4 Уточненная высота станины [3, рис. 10-17]:

$$h_{C1} = 19 \text{ мм.}$$

5.5 Магнитная индукция в месте распространения магнитного потока в станине при входе его в главный полюс  $B_{cn}$ , Тл:

$$B_{cn} = \frac{\sigma \cdot \Phi' \cdot 10^6}{2 \cdot (l_n + b_n) \cdot h_{C1}}, \quad (17)$$
$$B_{cn} = \frac{1,2 \cdot 7,43 \cdot 10^3}{2 \cdot (155 + 40) \cdot 17} = 1,345 \text{ Тл.}$$

5.6 Допустимое значение магнитной индукции в месте распространения магнитного потока в станине при входе его в главный полюс:

$$B_{cn.don.} = 1,7 \text{ Тл.}$$

5.7 Внутренний диаметр монолитной станины  $D_1$ , мм:

$$D_1 = D_{H1} - 2 \cdot h_{C1}, \quad (18)$$
$$D_1 = 308 - 2 \cdot 17 = 274 \text{ мм.}$$



5.8 Высота главного полюса  $h_n$ , мм:

$$h_n = \frac{D_1 - 4\delta - D_{H2}}{2}, \quad (19)$$

$$h_n = \frac{274 - 4 \cdot 1,6 - 160}{2} = 53,8 \text{ мм.}$$

5.9 Высота добавочного полюса  $h_n$ , мм:

$$h_n = \frac{D_1 - 4\delta_d - D_{H2}}{2}, \quad (20)$$

$$h_n = \frac{274 - 4 \cdot 3,3 - 160}{2} = 50,4 \text{ мм.}$$

## 6 ТИП И ШАГИ ОБМОТКИ ЯКОРЯ. КОЛИЧЕСТВО ВИТКОВ ОБМОТКИ, КОЛЛЕКТОРНЫХ ПЛАСТИН И ПАЗОВ

6.1 Предварительное значение тока якоря  $I_2$ , А:

$$I_2 = \frac{k_T \cdot P_2}{\eta \cdot U}, \quad (21)$$

$$I_2 = \frac{0,978 \cdot 5500}{0,82 \cdot 220} = 29,8 \text{ А.}$$

Принимаем простую волновую обмотку равnoseкционную [3, табл. 10-7] из провода ПЭТ-155.

6.2 Количество параллельных ветвей [3, табл. 10-8]:

$$2a = 2.$$

6.3 Предварительное количество витков обмотки якоря [3]:

$$\omega_2' = \frac{30 \cdot k_H \cdot U}{\frac{p}{a} \cdot n \cdot \Phi'}; \quad (22)$$

$$\omega_2' = \frac{30 \cdot 0,915 \cdot 220}{\frac{2}{1} \cdot 1500 \cdot 7,43 \cdot 10^{-3}} = 271.$$

6.4 Число секций в пазу [3, табл. 10-8]:

$$N_{ui} = 3.$$

6.5 Предварительное количество витков в секции:

$$\omega_{C2} = \frac{1,8 \cdot \omega_2'}{D_{H2}}; \quad (23)$$

$$\omega_{\tilde{N}2} = \frac{1,8 \cdot 271}{160} = 3,05.$$

6.6 Принятое значение количества витков в секции:

$$\omega_{C2} = 3.$$

6.7 Предварительное количество пазов якоря:

$$z_2' = \frac{\omega_2'}{N_{\text{ш}} \cdot \omega_{C2}}; \quad (24)$$

$$z_2' = \frac{271}{3 \cdot 3} = 30,1.$$

6.8 Принятое значение количества пазов якоря [3, табл. 10-8]:

$$z_2 = 29.$$

6.9 Количество коллекторных пластин:

$$K = N_{\text{ш}} \cdot z_2; \quad (25)$$

$$K = 3 \cdot 29 = 87.$$

6.10 Зубцовое деление по наружному диаметру якоря  $t_2$ , мм:

$$t_2 = \frac{\pi D_{H2}}{z_2}, \quad (26)$$

$$t_2 = \frac{3,14 \cdot 160}{29} = 17,32 \text{ мм.}$$

6.11 Наружный диаметр коллектора при полузакрытых пазах якоря и отсутствии петушков на коллекторе:

$$D_k = 0,77 \cdot 160 = 125 \text{ мм.} \quad (27)$$

6.12 Коллекторное деление  $t_k$ , мм:

$$t_k = \frac{\pi D_k}{K}, \quad (28)$$

$$t_k = \frac{3,14 \cdot 125}{87} = 4,51 \text{ мм.}$$

6.13 Максимальное напряжение между соседними коллекторными пластинами при нагрузке  $U_{k.\text{max}}$ , В:

$$U_{k.\text{max}} = \frac{2p \cdot U \cdot k_u}{\alpha' \cdot K}, \quad (29)$$

где  $k_u = 1,7$  – коэффициент искажения поля [3, рис. 10-19];

$$U_{k.\text{max}} = \frac{4 \cdot 220 \cdot 1,7}{0,62 \cdot 87} = 27,7 \text{ В.}$$

6.14 Предельно допустимое значение максимального напряжения между соседними коллекторными пластинами при нагрузке:

$$U_{k.\text{max}} = 50 \text{ В.}$$

6.15 Уточненное число витков обмотки якоря:

$$\omega_2 = \omega_{C2} \cdot K; \quad (30)$$

$$\omega_2 = 3 \cdot 87 = 261.$$

6.16 Количество эффективных проводников в пазу:

$$\begin{aligned} N_{n2} &= 2N_{\text{ш}} \cdot \omega_{C2}; \\ N_{n2} &= 2 \cdot 3 \cdot 3 = 18. \end{aligned} \quad (31)$$

6.17 Ток в пазу  $I_{n2\Sigma}$ , А:

$$\begin{aligned} I_{n2\Sigma} &= \frac{N_{n2} \cdot I_2}{2a}, \\ I_{n2\Sigma} &= \frac{18 \cdot 29,8}{2} = 268 \text{ А}. \end{aligned} \quad (32)$$

6.18 Уточненная линейная нагрузка якоря  $A_2$ , А:

$$\begin{aligned} A_2 &= \frac{20\omega_2 \cdot I_2}{\pi \cdot D_{H2} \cdot 2a}, \\ A_2 &= \frac{20 \cdot 261 \cdot 29,8}{3,14 \cdot 160 \cdot 2} = 154,8 \text{ А}. \end{aligned} \quad (33)$$

6.19 Количество реальных пазов [3, табл. 10-8]:

$$\begin{aligned} y_n &= \frac{z_2}{2p} - \varepsilon; \\ y_n &= \frac{29}{4} - \frac{1}{4} = 7. \end{aligned} \quad (34)$$

6.20 Количество элементарных пазов [3, табл. 10-8]:

$$\begin{aligned} y - y_k &= \frac{k-1}{p}; \\ y - y_k &= \frac{87-1}{2} = 43. \end{aligned} \quad (35)$$

6.21 Первый частичный шаг по пазам [3, табл. 10-8]:

$$\begin{aligned} y_1 &= N_{\text{ш}} \cdot y_n; \\ y_1 &= 3 \cdot 7 = 21. \end{aligned} \quad (36)$$

6.22 Второй частичный шаг по пазам [3, табл. 10-8]:

$$\begin{aligned} y_2 &= y - y_1; \\ y_2 &= 43 - 21 = 22. \end{aligned} \quad (37)$$

6.23 Высота паза якоря [3, рис. 10-21]:

$$h_{n2} = 25 \text{ мм.}$$

6.24 Высота спинки якоря  $h_{C2}$ , мм:

$$\begin{aligned} h_{C2} &= \frac{D_{H2} - D_2}{2} - h_{n2}, \\ h_{C2} &= \frac{160 - 50}{2} - 25 = 30 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (38)$$

По расчетным данным вычерчивается развернутая схема простой волновой обмотки якоря, приведенная на рис. 10-18 [3].

## 7 ОБМОТКА ЯКОРЯ С ОВАЛЬНЫМИ ПОЛУЗАКРЫТЫМИ ПАЗАМИ

7.1 Предварительная магнитная индукция в спинке якоря  $B'_{C2}$ , Тл:

$$B'_{C2} = \frac{\Phi' \cdot 10^6}{2l_{\phi 2} \cdot h_{C2}}, \quad (39)$$

$$B'_{C2} = \frac{7,43 \cdot 10^3}{2 \cdot 147,2 \cdot 30} = 0,841 \text{ Тл.}$$

7.2 Допускаемое значение магнитной индукции в спинке якоря при частоте перемангничивания  $f = \frac{pn}{60} = \frac{2 \cdot 1500}{60} = 50 \text{ Гц}$  [3, табл. 10-9]:

$$B_{C2} = 1,15 \text{ Тл.}$$

7.3 Предварительная магнитная индукция в зубцах [3, табл. 10-10]:

$$B'_{32} = 1,65 \text{ Тл.}$$

7.4 Ширина зубца  $B_{32}$ , мм:

$$b_{32} = \frac{t_2 \cdot B'_8}{k_c \cdot B'_{32}}, \quad (40)$$

$$b_{32} = \frac{17,32 \cdot 0,615}{0,95 \cdot 1,65} = 6,8 \text{ мм.}$$

7.5 Радиус паза больший  $r_1$ , мм:

$$r_1 = \frac{\pi(D_{H2} - 2h_{u2}) - z_2 \cdot b_{32}}{2(z_2 + \pi)}, \quad (41)$$

где  $h_{u2} = 0,8 \text{ мм}$  – высота шлица паза [5];

$$r_1 = \frac{\pi(160 - 2 \cdot 0,8) - 29 \cdot 6,8}{2(29 + \pi)} = 4,7 \text{ мм.}$$

7.6 Радиус паза меньший  $r_2$ , мм:

$$r_2 = \frac{\pi(D_{H2} - 2h_{H2}) - z_2 \cdot b_{32}}{2(z_2 - \pi)}, \quad (42)$$

$$r_2 = \frac{\pi(160 - 2 \cdot 25) - 29 \cdot 6,8}{2(29 - \pi)} = 2,9 \text{ мм.}$$

7.7 Ширина зубца, соответствующая вычисленным значениям радиусов паза  $b_{32}$ , мм:

$$b_{32} = \frac{\pi(D_{H2} - 2h_{u2} - 2r_1)}{z_2} - 2r_1, \quad (43)$$

$$b_{32} = \frac{\pi(160 - 2 \cdot 0,8 - 2 \cdot 4,7)}{29} - 2 \cdot 4,7 = 6,73 \text{ мм;}$$

$$b_{32} = \frac{\pi(D_{H2} - 2h_{H2} + 2r_2)}{z_2} - 2r_2, \quad (44)$$

$$b_{32} = \frac{\pi(160 - 2 \cdot 25 + 2 \cdot 2,9)}{29} - 2 \cdot 2,9 = 6,73 \text{ мм.}$$

7.8 Расстояние между центрами радиусов  $h_1$ , мм:

$$h_1 = h_{II2} - h_{u2} - r_1 - r_2; \quad (45)$$

$$h_1 = 25 - 0,8 - 4,7 - 2,9 = 16,6 \text{ мм.}$$

7.9 Площадь поперечного сечения паза в штампе  $S_2$ , мм<sup>2</sup>:

$$S_2 = \frac{\pi}{2}(r_1^2 + r_2^2) + (r_1 + r_2)h_1; \quad (46)$$

$$S_2 = \frac{\pi}{2}(4,7^2 + 2,9^2) + (4,7 + 2,9) \cdot 16,6 = 169,5 \text{ мм}^2.$$

7.10 Площадь поперечного сечения паза в свету  $S'_{II2}$ , мм<sup>2</sup>:

$$S'_{II2} = \frac{\pi}{2} \left[ \left( r_1 - \frac{b_c}{2} \right)^2 + \left( r_2 - \frac{b_c}{2} \right)^2 \right] + (r_1 + r_2 - b_c)h_1; \quad (47)$$

$$S'_{II2} = \frac{\pi}{2} \left[ \left( 4,7 - \frac{0,2}{2} \right)^2 + \left( 2,9 - \frac{0,2}{2} \right)^2 \right] + (4,7 + 2,9 - 0,2) \cdot 16,6 = 163,9 \text{ мм}^2.$$

7.11 Площадь поперечного сечения корпусной изоляции  $S_u$ , мм<sup>2</sup>:

$$S_u = b_u(2\pi r_1 + \pi r_2 + 2h_1), \quad (48)$$

где  $b_u = 0,5$  мм – односторонняя толщина корпусной изоляции [5];

$$S_u = 0,5(2\pi \cdot 4,7 + \pi \cdot 2,9 + 2 \cdot 16,6) = 35,3 \text{ мм}^2.$$

7.12 Площадь поперечного сечения клина и прокладок:

$$S_{кл} + S_{np} = 5 \cdot r_1; \quad (49)$$

$$S_{кл} + S_{np} = 5 \cdot 4,7 = 23,5 \text{ мм}^2.$$

7.13 Площадь поперечного сечения паза, занимаемая обмоткой:

$$S''_{II2} = S'_{II2} - S_u - S_{кл} - S_{np}; \quad (50)$$

$$S''_{II2} = 163,9 - 35,3 - 23,5 = 105,1 \text{ мм}^2.$$

7.14 Предварительный диаметр провода с изоляцией  $d'$ , мм:

$$d' = \sqrt{\frac{0,75 S''_{II2}}{N_{II2} \cdot c}}; \quad (51)$$

$$d' = \sqrt{\frac{0,75 \cdot 105,1}{18 \cdot 2}} = 1,48 \text{ мм.}$$

7.15 Ближайший стандартный диаметр провода с изоляцией и без изоляции [3, прил. 1]:

$$\frac{d}{d'} = \frac{1,4}{1,485}.$$

7.16 Уточненный коэффициент заполнения паза:

$$k_{II} = \frac{N_2 \cdot c \cdot (d')^2}{S''_{II2}}; \quad (52)$$

$$k_{II} = \frac{18 \cdot 2 \cdot 1,485^2}{105,1} = 0,755.$$

7.17 Площадь поперечного сечения неизолированного провода при принятом диаметре [3, прил. 1]:

$$S = 1,539 \text{ мм}^2.$$

7.18 Плотность тока в обмотке  $J_2$ , А/мм<sup>2</sup>:

$$J_2 = \frac{I_2}{2a \cdot c \cdot S}, \quad ; \quad (53)$$

$$J_2 = \frac{29,8}{2 \cdot 2 \cdot 1,539} = 4,84 \text{ А/мм}^2.$$

7.19 Удельная тепловая нагрузка якоря от потерь в обмотке:

$$A_2 \cdot J_2 = 154,8 \cdot 4,84 = 749 \text{ А/см мм}^2. \quad (54)$$

7.20 Допустимое значение удельной тепловой нагрузки якоря от потерь в обмотке [3, рис.10-22, табл. 10-4 и табл. 10-5]:

$$(A_2 \cdot J_2)_{доп} = 740 \text{ А/см мм}^2.$$

7.21 Среднее зубцовое деление якоря  $t_{cp}$ , мм:

$$t_{cp} = \frac{\pi(D_{H2} - h_{H2})}{z_2}; \quad (55)$$

$$t_{cp} = \frac{\pi(160 - 25)}{29} = 14,62 \text{ мм.}$$

7.22 Средняя ширина секции обмотки  $b_{cp}$ , мм:

$$b_{cp} = t_{cp} \cdot y_n; \quad (56)$$

$$b_{cp} = 14,62 \cdot 7 = 102,3 \text{ мм.}$$

7.23 Средняя длина одной лобовой части секции  $l_{л2}$ , мм:

$$l_{л2} = (0,7 + 0,4p)b_{cp} + 15; \quad (57)$$

$$l_{л2} = (0,7 + 0,4 \cdot 2) \cdot 102,3 + 15 = 168 \text{ мм.}$$

7.24 Средняя длина витка обмотки  $l_{cp2}$ , мм:

$$l_{cp2} = 2(l_2 + l_{л2}); \quad (58)$$

$$l_{cp2} = 2(155 + 168) = 646 \text{ мм.}$$

7.25 Сопротивление обмотки при температуре 20 °С  $r_2$ , Ом:

$$r_2 = \frac{\omega_2 \cdot l_{cp2}}{57 \cdot (2a)^2 \cdot c \cdot S \cdot 10^3}; \quad (59)$$

$$r_2 = \frac{261 \cdot 646}{57 \cdot 2^2 \cdot 2 \cdot 1,539 \cdot 10^3} = 0,24 \text{ Ом.}$$

7.26 Сопротивление обмотки при температуре 20 °С (в относительных единицах):

$$r_{2*} = \frac{r_2 \cdot I_2}{U}; \quad (60)$$

$$r_{2*} = \frac{0,24 \cdot 39,8}{220} = 0,0325 \text{ о.е.}$$

7.27 Контрольное значение сопротивления обмотки при температуре 20 °С:

$$r_{2*} = \frac{\pi \cdot D_{H2} \cdot l_{cp2} \cdot (A_2 J_2)}{114 \cdot 10^4 \cdot I_2 \cdot U}; \quad (61)$$

$$r_{2*} = \frac{\pi \cdot 160 \cdot 646 \cdot 749}{114 \cdot 10^4 \cdot 29,8 \cdot 220} = 0,0325.$$

7.28 Длина вылета лобовой части обмотки  $l_{\epsilon 2}$ , мм:

$$l_{\epsilon 2} = (0,12 + 0,14p) \cdot b_{cp} + 7,5; \quad (62)$$

$$l_{\epsilon 2} = (0,12 + 0,14 \cdot 2) \cdot 102,3 + 7,5 = 48,4 \text{ мм.}$$

7.29 Ширина шлица паза  $b_{u2}$ , мм:

$$b_{u2} = d' + 2 \cdot b_u + 0,3; \quad (63)$$

$$b_{\epsilon 2} = 1,485 + 2 \cdot 0,5 + 0,3 = 2,8 \text{ мм.}$$

По рассчитанным параметрам вычерчивается овальный полузакрытый паз ротора ДПТ, представленный на рис. 10-20 [3].

## 8 ОБМОТКА ДОБАВОЧНЫХ ПОЛЮСОВ

8.1 Поперечная магнитодвижущая сила (МДС) якоря  $F_2$ , А:

$$F_2 = \frac{\omega_2 \cdot I_2}{2p \cdot 2a}; \quad (64)$$

$$F_2 = \frac{261 \cdot 29,8}{4 \cdot 2} = 972 \text{ А.}$$

8.2 Предварительное количество витков катушки добавочного полюса у некомпенсированной машины:

$$\omega'_D = \frac{k'_D \cdot F_2 \cdot a_D}{I_2}, \quad (65)$$

где  $k'_D = 1,25$  – коэффициент добавочного полюса [5];

$a_D = 1$  – количество параллельных ветвей обмотки добавочного полюса [4];

$$\omega'_D = \frac{1,25 \cdot 972 \cdot 1}{29,8} = 40,77.$$

8.3 Уточнённое количество витков:

$$\omega_D = 41.$$

8.4 Уточнённая МДС катушки  $F_D$ , А:

$$F_D = \frac{\omega_D \cdot I_2}{a_D}; \quad (66)$$
$$F_D = \frac{41 \cdot 29,8}{1} = 1222 \text{ А.}$$

8.5 Уточнённое значение коэффициента добавочного полюса:

$$k_D = \frac{F_D}{F_2}; \quad (67)$$
$$k_D = \frac{1222}{972} = 1,26.$$

8.6 Предварительное значение плотности тока [3, рис. 10-26]:

$$J'_D = 3,3 \text{ А/мм}^2.$$

8.7 Предварительная площадь поперечного сечения проводника  $S'$ , мм<sup>2</sup>:

$$S' = \frac{I_2}{a_D \cdot J'_D}; \quad (68)$$
$$S' = \frac{39,8}{1 \cdot 3,3} = 9,03 \text{ мм}^2.$$

Принимаем в соответствии с [3, табл. 10-14] провод ПЭТП-155.

8.8 Размеры прямоугольной проволоки [3, прил. 2]:

$$a \times b = 2,36 \times 4 \text{ мм.}$$

8.9 Площадь поперечного сечения прямоугольной проволоки:

$$S = 8,89 \text{ мм}^2.$$

8.10 Размеры прямоугольной проволоки с изоляцией:

$$a' \times b' = 2,51 \times 4,15 \text{ мм.}$$

8.11 Уточнённая плотность тока в обмотке  $J_D = \text{А/мм}^2$ :

$$J_D = \frac{I_2}{a_D \cdot S}; \quad (69)$$
$$J_D = \frac{29,8}{1 \cdot 8,89} = 3,35 \text{ А/мм}^2.$$

8.12 Предварительная ширина катушки  $b'_{KD}$ , мм:

$$b'_{KD} = 0,12 \cdot D_{H2}; \quad (70)$$
$$b'_{KD} = 0,12 \cdot 160 = 19,2 \text{ мм.}$$



8.13 Средняя длина витка многослойной катушки из изолированных проводников  $l_{cp,д}$ , мм:

$$l_{cp,д} = 2(l_{д} + l_{д}') + \pi(b_{кд}' + 2b_3 + 2b_u), \quad (71)$$

где  $2b_3$  – двухсторонний зазор между изолированным сердечником полюса и катушкой;

$2b_u$  – двухсторонняя толщина изоляции сердечника, катушки и крепления катушки;  $2b_3 + 2b_u = 5$  мм [5];

$$l_{cp,д} = 2(145 + 19) + \pi(19,2 + 5) = 404 \text{ мм.}$$

8.14 Сопротивление обмотки при температуре 20 °С  $r_{д}$ , Ом:

$$r_{д} = \frac{2p_{д} \cdot \omega_{д} \cdot l_{cp,д}}{57 \cdot a_{д} \cdot S \cdot 10^3}; \quad (72)$$

$$r_{д} = \frac{4 \cdot 41 \cdot 404}{57 \cdot 1 \cdot 8,89 \cdot 10^3} = 0,13 \text{ Ом.}$$

8.15 Отношение сопротивления обмотки добавочных полюсов к сопротивлению обмотки якоря:

$$\frac{r_{д}}{r_2} = \frac{0,13}{0,24} = 0,54.$$

## 9 СТАБИЛИЗИРУЮЩАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ ОБМОТКА ГЛАВНЫХ ПОЛЮСОВ

Принимаем размер и марку провода такими же, как и у обмотки добавочных полюсов.

9.1 МДС стабилизирующей обмотки на полюс  $F_{noc}$ , А:

$$F_{noc} = 0,15 \cdot F_2; \quad (73)$$

$$F_{noc} = 0,15 \cdot 972 = 146 \text{ А.}$$

9.2 Предварительное количество витков в катушке:

$$\omega'_{noc} = \frac{F_{noc} \cdot a_{noc}}{I_2}; \quad (74)$$

$$\omega'_{noc} = \frac{146}{29,8} = 4,9.$$

9.3 Уточнённое количество витков:

$$\omega_{noc} = 5.$$

9.4 Уточнённое значение МДС обмотки  $F_{noc}$ , А:

$$F_{noc} = \frac{\omega_{noc} \cdot I_2}{a_{noc}}; \quad (75)$$

$$F_{noc} = \frac{5 \cdot 29,8}{1} = 149 \text{ А.}$$

9.5 Предварительная ширина катушки  $b_{к.ноч}$ , мм:

$$b_{к.ноч} = 0,1 \cdot D_{H2}; \quad (76)$$

$$b_{к.ноч} = 0,1 \cdot 160 = 16 \text{ мм.}$$

9.6 Средняя длина витка многослойной катушки из изолированных проводов  $l_{ср.ноч}$ , мм:

$$l_{ср.ноч} = 2(l_n + b_n) + \pi(b'_{к.ноч} + 2b_3 + 2b_u); \quad (77)$$

$$l_{ср.ноч} = 2(155 + 40) + \pi(16 + 5) = 456 \text{ мм.}$$

9.7 Сопротивление обмотки при температуре 20 °С  $r_{ноч}$ , Ом:

$$r_{ноч} = \frac{2p \cdot \omega_{ноч} \cdot l_{ср.ноч}}{57 \cdot a_{ноч}^2 \cdot S \cdot 10^3}; \quad (78)$$

$$r_{ноч} = \frac{4 \cdot 5 \cdot 456}{57 \cdot 1^2 \cdot 8,89 \cdot 10^3} = 0,018 \text{ Ом.}$$

9.8 Отношение сопротивления последовательной обмотки главных полюсов к сопротивлению обмотки якоря:

$$\frac{r_{ноч}}{r_2} = \frac{0,018}{0,24} = 0,075.$$

## 10 ХАРАКТЕРИСТИКА НАМАГНИЧИВАНИЯ МАШИНЫ

10.1 Сопротивление обмоток якорной цепи двигателя, приведённое к стандартной рабочей температуре:

$$m_T r_{2\Sigma} = m_T (r_2 + r_1 + r_\partial + r_{ноч}), \quad (79)$$

где  $m_T = 1,38$  – коэффициент, учитывающий нагревостойкость изоляции [4];

$$m_T r_{2\Sigma} = 1,38(0,24 + 0,13 + 0,018) = 0,535 \text{ Ом.}$$

10.2 Уточнённая электродвижущая сила (ЭДС) при номинальном режиме работы двигателя:

$$E_2 = U - I_2 m_T r_{2\Sigma} - \Delta U_{щ}, \quad (80)$$

где  $\Delta U_{щ} = 2 \text{ В}$  – падение напряжения, приходящееся на пару щеток [4];

$$E_2 = 220 - 29,8 \cdot 0,535 - 2 = 202,1 \text{ В.}$$

10.3 Уточнённый магнитный поток  $\Phi$ , Вб:

$$\Phi = \frac{30 \cdot E_2}{\left(\frac{p}{a}\right) \cdot n \cdot \omega_2}; \quad (81)$$

$$\Phi = \frac{30 \cdot 202,1}{2 \cdot 1500 \cdot 261} = 7,74 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.}$$

10.4 Площадь поперечного сечения в воздушном зазоре  $S_{\delta}$ , мм<sup>2</sup>:

$$S_{\delta} = b'_{H.II} \cdot l'_2; \quad (82)$$

$$S_{\delta} = 77,9 \cdot 155 = 12074 \text{ мм}^2.$$

10.5 Уточнённая магнитная индукция в воздушном зазоре  $B_{\delta}$ , Тл:

$$B_{\delta} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{S_{\delta}}; \quad (83)$$

$$B_{\delta} = \frac{7,74 \cdot 10^3}{12074} = 0,64 \text{ Тл}.$$

10.6 Коэффициент, учитывающий увеличение магнитного сопротивления воздушного зазора вследствие зубчатого строения якоря:

$$k_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{w2}}{t_2 - b_{w2} + 5 \frac{\delta \cdot t_2}{b_{w2}}}; \quad (84)$$

$$k_{\delta 2} = 1 + \frac{2,8}{17,32 - 2,8 + \frac{5 \cdot 1,6 \cdot 17,32}{2,8}} = 1,04.$$

10.7 Общий коэффициент воздушного зазора:

$$k_{\delta} = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} \cdot k_{\delta} \cdot k_{\delta k}; \quad (85)$$

$$k_{\delta} = k_{\delta 2} = 1,04.$$

10.8 МДС воздушного зазора  $F_{\delta}$ , А:

$$F_{\delta} = 0,8 \cdot \delta \cdot k_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot 10^3; \quad (86)$$

$$F_{\delta} = 0,8 \cdot 1,6 \cdot 1,04 \cdot 0,64 \cdot 10^3 = 852 \text{ А}.$$

10.9 Площадь равновеликого поперечного сечения зубцов  $S_{32}$ , мм<sup>2</sup>:

$$S_{32} = \frac{z_2}{2p} \cdot \alpha' \cdot b_{32} \cdot l_{\phi 2}; \quad (87)$$

$$S_{32} = \frac{29}{4} \cdot 0,62 \cdot 6,73 \cdot 147,2 = 4453 \text{ мм}^2.$$

10.10 Уточнённая магнитная индукция в зубцах  $B_{32}$ , Тл:

$$B_{32} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{S_{32}}; \quad (88)$$

$$B_{32} = \frac{7,74 \cdot 10^3}{4453} = 1,74 \text{ Тл}.$$

10.11 Величина напряженности в зубцах [3. прил. 5]:

$$H_{32} = 47 \frac{\text{А}}{\text{см}}.$$

10.12 Средняя длина пути магнитного потока  $l_{32}$ , мм:

$$l_{32} = h_{II2} - 0,2r_2; \quad (89)$$

$$l_{32} = 25 - 0,2 \cdot 2,9 = 24,4 \text{ мм}.$$

10.13 МДС зубцов  $F_{32}$ , А:

$$F_{32} = 0,1 \cdot H_{32} \cdot l_{32}; \quad (90)$$
$$F_{32} = 0,1 \cdot 47 \cdot 24,4 = 115 \text{ А.}$$

10.14 Площадь поперечного сечения спинки якоря без аксиальных каналов  $S_{C2}$ , мм<sup>2</sup>:

$$S_{C2} = h_{C2} \cdot l_{\phi 2}; \quad (91)$$
$$S_{C2} = 30 \cdot 147,2 = 4416 \text{ мм}^2.$$

10.15 Уточнённая магнитная индукция в спинке якоря  $B_{C2}$ , Тл:

$$B_{C2} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot S_{C2}}, \text{ Тл}; \quad (92)$$
$$B_{C2} = \frac{7,74 \cdot 10^3}{2 \cdot 4416} = 0,88 \text{ Тл.}$$

10.16 Величина напряженности в спинке якоря [3, прил. 5]:

$$H_{C2} = 0,96 \frac{\text{А}}{\text{см}}.$$

10.17 Средняя длина пути магнитного потока  $l_{C2}$ , мм:

$$l_{C2} = \frac{\pi(D_2 + h_{C2})}{4p} + \frac{h_{C2}}{2}; \quad (93)$$
$$l_{C2} = \frac{\pi(50 + 30)}{8} + \frac{30}{2} = 46 \text{ мм.}$$

10.18 МДС спинки якоря  $F_{C2}$ , А:

$$F_{C2} = 0,1 \cdot H_{C2} \cdot l_{C2}; \quad (94)$$
$$F_{C2} = 0,1 \cdot 0,96 \cdot 46 = 4 \text{ А.}$$

10.19 Площадь поперечного сечения сердечника главного полюса  $S_n$ , мм<sup>2</sup>:

$$S_n = b_n \cdot l_{\phi n}; \quad (95)$$
$$S_n = 40 \cdot 151,9 = 6076 \text{ мм}^2.$$

10.20 Уточнённая магнитная индукция в сердечнике полюса  $B_n$ , Тл:

$$B_n = \frac{\sigma \cdot \Phi \cdot 10^6}{S_n}; \quad (96)$$
$$B_n = \frac{1,2 \cdot 7,74 \cdot 10^3}{6076} = 1,53 \text{ Тл.}$$

10.21 Величина напряженности в сердечнике полюса [3, прил. 20]:

$$H_n = 7,9 \frac{\text{А}}{\text{см}}.$$

10.22 Средняя длина пути магнитного потока:

$$l_{c.n} = h_n = 53,8 \text{ мм.}$$

10.23 МДС сердечника полюса  $F_{c.n.}$ , А:

$$F_{c.n.} = 0,1 \cdot H_n \cdot l_{c.n.}; \quad (97)$$
$$F_{c.n.} = 0,1 \cdot 7,9 \cdot 53,8 = 43 \text{ А.}$$

10.24 Эквивалентный зазор в стыке между главным полюсом и станиной  $\delta_{n1}$ , мм:

$$\begin{aligned}\delta_{n1} &= 2l_n \cdot 10^{-4} + 0,1; \\ \delta_{n1} &= 2 \cdot 155 \cdot 10^{-4} + 0,1 = 0,13 \text{ мм.}\end{aligned}\quad (98)$$

10.25 МДС второго зазора  $F_{n1}$ , А:

$$\begin{aligned}F_{n1} &= 0,8 \cdot \delta_{n1} \cdot B_n \cdot 10^3; \\ F_{n1} &= 0,8 \cdot 0,13 \cdot 1,53 \cdot 10^3 = 159 \text{ А.}\end{aligned}\quad (99)$$

10.26 Площадь поперечного сечения станины из монолитного материала  $S_{C1}$ , мм<sup>2</sup>:

$$\begin{aligned}S_{C1} &= h_{C1} \cdot l_1; \\ S_{C1} &= 17 \cdot 235 = 3995 \text{ мм}^2.\end{aligned}\quad (100)$$

10.27 Уточненная магнитная индукция в станине  $B_{C1}$ , Тл:

$$\begin{aligned}B_{C1} &= \frac{\sigma \cdot \Phi \cdot 10^6}{2 \cdot S_{C1}}; \\ B_{C1} &= \frac{1,2 \cdot 7,74 \cdot 10^3}{2 \cdot 3995} = 1,16 \text{ Тл.}\end{aligned}\quad (101)$$

10.28 Величина напряженности в станине [3, прил. 21]:

$$H_{C1} = 12,1 \frac{\text{А}}{\text{см}}.$$

10.29 Средняя длина пути магнитного потока  $l_{C1}$ , мм:

$$\begin{aligned}l_{C1} &= \frac{\pi(D_1 + h_{C1})}{4p} + \frac{h_{C1}}{2}; \\ l_{C1} &= \frac{\pi(274 + 17)}{8} + \frac{17}{2} = 123 \text{ мм.}\end{aligned}\quad (102)$$

10.30 МДС станины  $F_{C1}$ , А:

$$\begin{aligned}F_{C1} &= 0,1 \cdot H_{C1} \cdot l_{C1}; \\ F_{C1} &= 0,1 \cdot 12,1 \cdot 123 = 149 \text{ А.}\end{aligned}\quad (103)$$

10.31 Суммарная магнитодвижущая сила магнитной цепи  $F_{\Sigma}$ , А [4]:

$$\begin{aligned}F_{\Sigma} &= F_{\delta} + F_{\gamma 2} + F_{C2} + F_{\gamma 1} + F_{c.n.} + F_{n1} + F_{C1}; \\ F_{\Sigma} &= 852 + 115 + 4 + 43 + 159 + 149 = 1322 \text{ А.}\end{aligned}\quad (104)$$

10.32 Коэффициент насыщения магнитной цепи:

$$\begin{aligned}k_{нас} &= \frac{F_{\Sigma}}{(F_{\delta} + F_{пл})}; \\ k_{нас} &= \frac{1322}{852 + 159} = 1,3.\end{aligned}\quad (105)$$

## 11 ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ОБМОТКА ГЛАВНЫХ ПОЛЮСОВ

11.01 Отношение магнитодвижущих сил:

$$\frac{F_2}{F_\Sigma} = \frac{972}{1322} = 0,74.$$

11.02 Коэффициент, учитывающий поперечную МДС якоря и суммарную МДС магнитной цепи [3, рис. 10-29]:

$$k_{p2} = 0,108.$$

11.03 Размагничивающее действие реакции якоря  $F_{p2}$ , А:

$$F_{p2} = k_{p2} \cdot F_2; \quad (106)$$

$$F_{p2} = 0,108 \cdot 972 = 105 \text{ А.}$$

11.04 МДС обмотки возбуждения главных полюсов  $F_{II}$ , А:

$$F_{II} = F_\Sigma + F_{p2} - F_{noc}; \quad (107)$$

$$F_{II} = 1322 + 105 - 149 = 1278 \text{ А.}$$

11.05 Предварительная ширина катушки  $b'_{к.н}$ , мм:

$$b'_{к.н} = 0,12 \cdot D_{H2}; \quad (108)$$

$$b'_{к.н} = 0,12 \cdot 160 = 19,2 \text{ мм.}$$

11.06 Средняя длина витка обмотки  $l_{ср.н}$ , мм:

$$l_{ср.н} = 2(l_n + b_n) + \pi(b'_{к.н} + 2b_z + 2b_u); \quad (109)$$

$$l_{ср.н} = 2(155 + 40) + \pi(19,2 + 5) = 466 \text{ мм.}$$

По данным табл. 1 строится характеристика намагничивания ДПТ, представленная на рис. 10-289, а [3].

11.07 Предварительное поперечное сечение провода  $S'$ , мм<sup>2</sup>:

$$S' = \frac{1,15 \cdot m_T \cdot 2p \cdot F_n \cdot l_{ср.н}}{57 \cdot U_B \cdot 10^3}; \quad (110)$$

$$S' = \frac{1,15 \cdot 1,38 \cdot 4 \cdot 1278 \cdot 466}{57 \cdot 220 \cdot 10^3} = 0,3 \text{ мм}^2.$$

Таблица 1

Данные расчета характеристики намагничивания

Наименование участка			Зазор между якорем и главным полюсом	Зубцы якоря	Спинка якоря	Сердечник главного полюса	Зазор между главным полюсом и станиной	Станина	$F_{\Sigma}$ , А
Средняя длина пути $\Phi$ , мм			1,6	24,4	46	53,8	0,13	123	
Площадь поперечного сечения участка, мм <sup>2</sup>			12074	4499	4416	6076	–	3995	
Коэффициенты			1,04	1,12	–	1,2	–	1,2	
Поток $\Phi$ , % ( $Вб \cdot 10^{-3}$ )	50 (3,87)	В	0,32	0,87	0,44	0,76	0,76	0,58	
		Н	–	0,95	0,59	1,0	–	4,7	
		F	426	2	3	5	79	58	573
	75 (5,80)	В	0,48	1,3	0,66	1,15	1,15	0,87	
		Н	–	2,0	0,74	2,4	–	7,66	
		F	639	5	3	13	119	94	875
	90 (6,97)	В	0,58	1,56	0,79	1,38	1,38	1,04	
		Н	–	12,4	0,87	4,7	–	9,9	
		F	767	30	4	25	143	122	1091
	100 (7,74)	В	0,64	1,74	0,88	1,53	1,53	1,16	
		Н	–	47	0,96	7,9	–	12,1	
		F	852	115	4	43	159	149	1322
	110(8,5 1)	В	0,70	1,91	0,96	1,68	1,68	1,28	
		Н	–	120	1,05	18	–	15,2	
		F	937	293	5	97	175	187	1694
	115 (8,90)	В	0,74	2,0	1,01	1,76	1,76	1,33	
		Н	–	180	1,1	28	–	17,2	
		F	980	439	6	151	183	212	1971

Принимаем круглый провод марки ПЭТ-155 [3, табл. 10-14].

11.08 Ближайшее стандартное поперечное сечение провода [1, прил. 1]:

$$S = 0,302 \text{ мм}^2.$$

11.09 Уточнённый коэффициент запаса:

$$k_{зан} = \frac{1,15 \cdot S}{S'}; \quad (111)$$

$$k_{зан} = \frac{1,15 \cdot 0,302}{0,3} = 1,16.$$

11.10 Диаметр принятого провода без изоляции [3, прил. 1]:

$$d = 0,62 \text{ мм.}$$

11.11 Диаметр принятого провода с изоляцией [3, прил. 1]:

$$d' = 0,675 \text{ мм.}$$

11.12 Предварительная плотность тока в обмотке:

$$J'_n = 3,45 \text{ А/мм}^2.$$

11.13 Предварительное количество витков одной катушке:

$$\omega'_n = \frac{k_{зан} \cdot F_n}{J'_n \cdot S}; \quad (112)$$

$$\omega'_n = \frac{1,16 \cdot 1278}{3,45 \cdot 0,302} = 1418.$$

11.14 Уточнённое количество витков:

$$\omega_n = 1400.$$

11.15 Уточнённая плотность тока в обмотке  $J_n$ , А/мм<sup>2</sup>:

$$J_n = \frac{k_{зан} \cdot F_n}{\omega_n \cdot S}; \quad (113)$$

$$J_n = \frac{1,16 \cdot 1278}{1400 \cdot 0,302} = 3,51 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$$

11.16 Соппротивление обмотки при температуре 20 °С  $r_n$ , Ом:

$$r_n = \frac{2p \cdot \omega_n \cdot l_{cp,n}}{57 \cdot S \cdot 10^3}; \quad (114)$$

$$r_i = \frac{4 \cdot 1400 \cdot 466}{57 \cdot 0,302 \cdot 10^3} = 151,6 \text{ Ом.}$$

11.17 Максимальный ток обмотки  $I_{n.\max}$ , А:

$$I_{n.\max} = \frac{U_n}{m_T \cdot r_n}; \quad (115)$$

$$I_{n.\max} = \frac{220}{1,38 \cdot 151,6} = 1,05 \text{ А.}$$

11.18 Максимальная МДС  $F_{n.\max}$ , А:

$$F_{n.\max} = I_{n.\max} \cdot \omega_n; \quad (116)$$

$$F_{n.\max} = 1,05 \cdot 1400 = 1470 \text{ А.}$$



## 12 РАЗМЕЩЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБМОТКИ ГЛАВНЫХ ПОЛЮСОВ

Принимаем трапецеидальную форму поперечного сечения катушки с раскладкой витков по средней ширине  $N_{\sigma} = 34$  и высоте  $N_B = 42$ .

12.1 Ширина катушки  $b_k$ , мм:

$$\begin{aligned} b_k &= 1,05 \cdot N_{III} \cdot d'; \\ b_k &= 1,05 \cdot 34 \cdot 0,675 = 24 \text{ мм.} \end{aligned} \quad (117)$$

12.2 Высота катушки  $h_k$ , мм:

$$\begin{aligned} h_k &= 1,05 \cdot N_B \cdot d'; \\ h_k &= 1,05 \cdot 42 \cdot 0,675 = 30 \text{ мм.} \end{aligned} \quad (118)$$

## 13 РАЗМЕЩЕНИЕ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ОБМОТКИ

13.1 Ширина катушки  $b_k$ , мм:

$$\begin{aligned} b_k &= 1,05 \cdot N_{III} \cdot a'; \\ b_k &= 1,05 \cdot 2,47 \cdot 5 = 13 \text{ мм.} \end{aligned} \quad (119)$$

13.2 Высота катушки  $h_k$ , мм:

$$\begin{aligned} h_k &= 1,05 \cdot N_B \cdot b'; \\ h_k &= 1,05 \cdot 1 \cdot 4,15 = 5 \text{ мм.} \end{aligned} \quad (120)$$

## 14 РАЗМЕЩЕНИЕ ОБМОТКИ ДОБАВОЧНЫХ ПОЛЮСОВ

Принимаем форму параллелепипеда.

14.1 Ширина катушки  $b_k$ , мм:

$$\begin{aligned} b_k &= 1,05 \cdot N_{III} \cdot a'; \\ b_k &= 1,05 \cdot 2,47 \cdot 5 = 13 \text{ мм.} \end{aligned} \quad (121)$$

14.2 Высота катушки  $h_k$ , мм:

$$\begin{aligned} h_k &= 1,05 \cdot N_B \cdot b'; \\ h_k &= 1,05 \cdot 8 \cdot 4,15 = 35 \text{ мм.} \end{aligned} \quad (122)$$

Эскиз расположения катушек в междуполюсном окне приведен на рис. 10-31, а [3].

## 15 ЩЕТКИ И КОЛЛЕКТОР

15.1 Ширина щетки:

$$t = 10 \text{ мм.}$$

15.2 Длина щетки:

$$a = 12,5 \text{ мм.}$$

15.3 Число перекрытых щеткой коллекторных пластин:

$$\gamma = \frac{t}{t_K}; \quad (123)$$
$$\gamma = \frac{10}{4,51} = 2,2.$$

15.4 Укорочение:

$$\epsilon_K = \frac{K}{2p} - y_1; \quad (124)$$
$$\epsilon_K = \frac{87}{4} - 21 = 0,75.$$

15.5 Ширина зоны коммутации  $b_{з.к}$ , мм:

$$b_{з.к} = \frac{\left( \frac{t}{t_K} + N_{III} - \frac{a}{p} + \epsilon_K \right) t_K \cdot D_H}{D_K}; \quad (125)$$
$$b_{з.к} = \frac{\left( \frac{10}{4,51} + 3 - \frac{1}{2} + 0,75 \right) \cdot 4,51 \cdot 160}{125} = 31,5 \text{ мм.}$$

15.6 Критерий выбора ширины щетки:

$$k_{з.к} = \frac{b_{з.к}}{\tau - b_{н.н}}; \quad (126)$$
$$k_{з.к} = \frac{31,5}{125,6 - 78} = 0,66.$$

15.7 Контактная площадь одной щетки  $S_{щ}$ , мм<sup>2</sup>:

$$S_{щ} = t \cdot a; \quad (127)$$
$$S_{щ} = 10 \cdot 12,5 = 125 \text{ мм}^2.$$

15.8 Необходимая контактная площадь всех щеток  $S'_{щ\Sigma}$ , мм<sup>2</sup>:

$$S'_{щ\Sigma} = \frac{2I_2 \cdot 10^2}{J'_{щ}}, \quad (128)$$

где  $J'_{щ} = 8 \text{ А/см}^2$  – плотность тока под щетками [5];

$$S'_{щ\Sigma} = \frac{2 \cdot 29,8 \cdot 10^2}{8} = 745 \text{ мм}^2.$$

15.9 Количество щеток на одном бранжете:

$$N'_{щ.б} = \frac{S'_{щ\Sigma}}{2p \cdot S_{щ}}; \quad (129)$$

$$N'_{щ.б} = \frac{745}{4 \cdot 125} = 1,49.$$

15.10 Уточнённое количество щеток на одном бранжете:

$$N_{щ.б} = 2.$$

15.11 Уточнённая контактная площадь всех щеток  $S_{щ\Sigma}$ , мм<sup>2</sup>:

$$S_{щ\Sigma} = N_{щ\Sigma} \cdot 2p \cdot S_{щ}; \quad (130)$$

$$S_{щ\Sigma} = 2 \cdot 4 \cdot 125 = 1000 \text{ мм}^2.$$

15.12 Уточнённая плотность тока под щетками  $J_{щ}$ , А/см:

$$J_{щ} = \frac{2I_2 \cdot 10^2}{S_{щ\Sigma}}; \quad (131)$$

$$J_{щ} = \frac{2 \cdot 29,8 \cdot 10^2}{1000} = 5,96 \text{ А/см}^2.$$

15.13 Активная длина коллектора  $l_k$ , мм:

$$l_k = N_{щ.б} \cdot (a + 8) + 10; \quad (132)$$

$$l_k = 2 \cdot (12,5 + 8) + 10 = 51 \text{ мм}.$$

15.14 Окружная скорость коллектора при номинальной частоте вращения  $v_k$ , м/с:

$$v_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n_{ном}}{60000}; \quad (133)$$

$$v_k = \frac{\pi \cdot 125 \cdot 1500}{60000} = 9,8 \text{ м/с}.$$

## 16 КОММУТАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ

16.1 Проводимость рассеяния овального полузакрытого паза:

$$\lambda_{П2} = 0,6 \frac{h_2}{2r_2} + \frac{h_2}{b_2} + \frac{l_2}{l_2} + \frac{2,5 \cdot 10^6}{\omega_{C2} \cdot l_2 \cdot A_2 \cdot v_2} \cdot \frac{a}{p}; \quad (134)$$

$$\lambda_{П2} = 0,6 \frac{25}{2 \cdot 2,9} + \frac{0,8}{2,8} + \frac{168}{155} + \frac{2,5 \cdot 10^6}{3 \cdot 155 \cdot 154,8 \cdot 12,56} \cdot \frac{1}{2} = 5,34.$$

16.2 Окружная скорость якоря  $v_{2max}$ , м/с:

$$v_{2max} = \frac{\pi \cdot D_{H2} \cdot n}{60000}; \quad (135)$$

$$v_{2max} = \frac{\pi \cdot 160 \cdot 3000}{60000} = 25,1 \text{ м/с}.$$

### 16.3 Реактивная ЭДС коммутируемой секции:

$$E_p = 2 \cdot \omega_{C2} \cdot l_2 \cdot A_2 \cdot v_2 \cdot \lambda_{П2} \cdot 10^{-7}, \text{ В}; \quad (136)$$

$$E_p = 2 \cdot 3 \cdot 155 \cdot 154,8 \cdot 25,1 \cdot 5,34 \cdot 10^{-7} = 1,9 \text{ В}.$$

16.4 Среднее значение магнитной индукции в зазоре под добавочным полюсом:

$$B_{\delta Д} = \lambda_{П2} \cdot A_2 \cdot 10^{-4}; \quad (137)$$

$$B_{\delta Д} = 5,34 \cdot 154,8 \cdot 10^{-4} = 0,08 \text{ Тл}.$$

16.5 Коэффициент, учитывающий увеличение магнитного сопротивления воздушного зазора вследствие зубчатого строения якоря:

$$k_{\delta Д2} = 1 + \frac{b_{u2}}{t_2 - b_{u2} + 5 \frac{\delta \cdot t_2}{b_{u2}}}; \quad (138)$$

$$k_{\delta Д2} = 1 + \frac{2,8}{17,32 - 2,8 + \frac{5 \cdot 3,3 \cdot 17,32}{2,8}} = 1,02.$$

16.6 Общий коэффициент воздушного зазора:

$$k_{\delta Д} = k_{\delta Д2} \cdot k_{\delta Д} \cdot k_{\kappa Д}; \quad (139)$$

$$k_{\delta Д} = k_{\delta Д2} = 1,02.$$

16.7 Необходимый зазор под добавочным полюсом  $\delta_{Д}$ , мм:

$$\delta_{Д} = \frac{F_{Д} + F_1 - F_2}{0,08 \cdot B_{\delta Д} \cdot k_{\delta Д}}; \quad (140)$$

$$\delta_{Д} = \frac{1222 - 972}{0,08 \cdot 0,08 \cdot 1,02} = 3,8 \text{ мм}.$$

16.8 Коэффициент, учитывающий увеличение магнитного сопротивления воздушного зазора вследствие зубчатого строения якоря:

$$k_{\delta Д2} = 1 + \frac{b_{u2}}{t_2 - b_{u2} + 5 \frac{\delta_{Д} \cdot t_2}{b_{u2}}}; \quad (141)$$

$$k_{\delta Д2} = 1 + \frac{2,8}{17,32 - 2,8 + \frac{5 \cdot 3,8 \cdot 17,32}{2,8}} = 1,02.$$

16.9 Общий коэффициент воздушного зазора:

$$k_{\delta Д} = k_{\delta Д2} \cdot k_{\delta Д} \cdot k_{\kappa Д}; \quad (142)$$

$$k_{\delta Д} = k_{\delta Д2} = 1,02.$$

16.10 Необходимый зазор под добавочным полюсом:

$$\delta_{Д} = 4,3 \text{ мм}.$$

16.11 Магнитный поток в зазоре под добавочным полюсом при номинальной нагрузке  $\Phi_{\delta D}$ , Вб:

$$\Phi_{\delta D} = b_{з.к} \cdot l_{H.D} \cdot B_{\delta D} \cdot 10^{-6}; \quad (143)$$

$$\Phi_{\delta D} = 31,5 \cdot 155 \cdot 0,08 \cdot 10^{-6} = 0,39 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.}$$

16.12 Магнитный поток в зазоре под добавочным полюсом при перегрузке  $\Phi'_{\delta D}$ , Вб:

$$\Phi'_{\delta D} = \Phi_{\delta D} \frac{I_{\max}}{I_H}; \quad (144)$$

$$\Phi'_{\delta D} = 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,39 = 0,585 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.}$$

16.13 Магнитный поток в сердечнике добавочного полюса при номинальной нагрузке  $\Phi_D$ , Вб:

$$\Phi_D = \sigma_D \cdot \Phi_{\delta D}, \quad (145)$$

где  $\sigma_D = 3$  – коэффициент магнитного рассеяния добавочных полюсов при  $2p_D = 2p$  и отсутствии компенсационной обмотки [3];

$$\Phi_D = 3 \cdot 0,39 \cdot 10^{-3} = 1,17 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.}$$

16.14 Магнитный поток в сердечнике добавочного полюса при перегрузке  $\Phi'_D$ , Вб:

$$\Phi'_D = \Phi_D \frac{I_{\max}}{I_H}; \quad (146)$$

$$\Phi'_D = 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,17 = 1,75 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.}$$

16.15 Площадь поперечного сечения сердечника добавочного полюса  $S_D$ , мм<sup>2</sup>:

$$S_D = b'_D \cdot l_D \cdot k_C; \quad (147)$$

$$S_D = 19 \cdot 145 \cdot 0,98 = 2700 \text{ мм}^2.$$

16.16 Магнитная индукция в сердечнике добавочного полюса при перегрузке  $B_D$ , Тл:

$$B_D = \frac{\Phi'_D \cdot 10^6}{S_D}; \quad (148)$$

$$B_D = \frac{1,75 \cdot 10^3}{2700} = 0,648 \text{ Тл.}$$

16.17 Расчетная магнитная индукция на участках станины, в которых суммируются магнитные потоки главного и добавочного полюсов  $B''_{C1}$ , Тл:

$$B''_{C1} = \frac{\sigma \cdot \Phi + \Phi'_D}{2S_{C1}} \cdot 10^6; \quad (149)$$

$$B''_{C1} = \frac{1,2 \cdot 7,74 \cdot 10^{-3} + 1,75 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3995} \cdot 10^6 = 1,38 \text{ Тл.}$$

16.18 Принятая величина магнитной индукции:

$$B''_{C1} = 1,6 \text{ Тл.}$$

16.19 Расчетная магнитная индукция на участках спинки якоря, в которых суммируются магнитные потоки главного и добавочного полюсов  $B''_{C2}$ , Тл:

$$B''_{C2} = \frac{\Phi + \Phi'_{\delta II}}{2S_{C2}} \cdot 10^6; \quad (150)$$

$$B''_{C2} = \frac{7,74 \cdot 10^{-3} + 0,585 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 4416} \cdot 10^6 = 0,94 \text{ Тл.}$$

16.20 Принятое значение магнитной индукции:

$$B''_{C2} = 1,7 \text{ Тл.}$$

## 17 НОМИНАЛЬНЫЙ РЕЖИМ

17.1 Масса стали зубцов якоря с овальными полузакрытыми пазами  $m_{3,2}$ , кг:

$$m_{3,2} = 7,8 \cdot z_2 \cdot b_{3,2} \left( h_1 + \frac{r_1 + r_2}{2} \right) l_{\phi 2} \cdot 10^{-6}; \quad (151)$$

$$m_{3,2} = 7,8 \cdot 29 \cdot 6,8 \left( 16,6 + \frac{4,7 + 2,9}{2} \right) 147 \cdot 10^{-6} = 4,6 \text{ кг.}$$

17.2 Магнитные потери в зубцах  $P_{3,2}$ , Вт:

$$P_{3,2} = 2,3 \cdot p_{1,0} \cdot \left( \frac{f}{50} \right)^{\beta} \cdot B_{3,2}^2 \cdot m_{3,2}, \quad (152)$$

где  $p_{1,0} = 2,5$  – удельные магнитные потери в стали при  $B = 1$  Тл и  $f = 50$  Гц [5];

$\beta = 1,5$  – коэффициент, учитывающий марку стали [4];

$$P_{3,2} = 2,3 \cdot 2,5 \left( \frac{50}{50} \right)^{1,5} \cdot 1,72^2 \cdot 4,6 = 78 \text{ Вт.}$$

17.3 Масса стали спинки якоря  $m_{C2}$ , кг:

$$m_{C2} = 7,8 \left\{ \frac{\pi [(D_{H2} - 2h_{II2})^2 - D_2^2]}{4} - 0,785 \cdot n_K \cdot d_K^2 \right\} l_{\phi 2} \cdot 10^{-6}; \quad (153)$$

$$m_{C2} = 7,8 \left\{ \frac{\pi [(160 - 2 \cdot 25)^2 - 50^2]}{4} \right\} \cdot 147,2 \cdot 10^{-6} = 8,7 \text{ кг.}$$

17.4 Магнитные потери в спинке якоря  $P_{C2}$ , Вт:

$$P_{C2} = 2,3 \cdot p_{1,0} \cdot \left( \frac{f}{50} \right)^{\beta} \cdot B_{C2}^2 \cdot m_{C2}; \quad (154)$$

$$P_{C2} = 2,3 \cdot 2,5 \left( \frac{50}{50} \right)^{1,5} \cdot 0,88^2 \cdot 8,7 = 39 \text{ Вт.}$$

17.5 Суммарные магнитные потери в стали  $P_{C\Sigma}$ , Вт:

$$P_{C\Sigma} = P_{32} + P_{C2};$$

$$P_{C\Sigma} = 78 + 39 = 117 \text{ Вт.} \quad (155)$$

17.6 Потери на трение щеток о коллектор  $P_{Tщ}$ , Вт:

$$P_{Tщ} = 5 \cdot S_{щ\Sigma} \cdot v_K \cdot 10^{-3};$$

$$P_{Tщ} = 5 \cdot 1000 \cdot 9,8 \cdot 10^{-3} = 49 \text{ Вт.} \quad (156)$$

17.7 Потери на трение подшипников, трение о воздух и на вентиляцию машины  $P_{ТП}$ , Вт:

$$P_{ТП} + P_{вен} = 2200 \cdot D_{H2}^{3,6} \left( \frac{n}{1500} \right)^2 \cdot 10^{-9};$$

$$P_{ТП} + P_{вен} = 2200 \cdot 160^{3,6} \left( \frac{1500}{1500} \right)^2 \cdot 10^{-9} = 189 \text{ Вт.} \quad (157)$$

17.8 Суммарные механические потери  $P_{мх.\Sigma}$ , Вт:

$$P_{мх.\Sigma} = P_{Tщ} + P_{ТП} + P_{вен};$$

$$P_{мх.\Sigma} = 49 + 189 = 238 \text{ Вт.} \quad (158)$$

17.9 Добавочные потери у некомпенсированного двигателя  $P_D$ , Вт:

$$P_D = \frac{0,01 \cdot P_2}{\eta};$$

$$P_D = \frac{0,01 \cdot 5500}{0,82} = 67 \text{ Вт.} \quad (159)$$

17.10 Электромагнитная мощность двигателя  $P_{эм}$ , Вт:

$$P_{эм} = P_{H2} + P_{C\Sigma} + P_{мх.\Sigma} + P_D;$$

$$P_{эм} = 5500 + 117 + 238 + 67 = 5922 \text{ Вт.} \quad (160)$$

17.11 ЭДС якоря двигателя  $E_2$ , В:

$$E_2 = \frac{U - \Delta U_{щ}}{2} + \sqrt{\left( \frac{U - \Delta U_{щ}}{2} \right)^2 - P_{эм} \cdot m_T r_{2\Sigma}};$$

$$E_2 = \frac{220 - 2}{2} + \sqrt{\left( \frac{220 - 2}{2} \right)^2 - 5922 \cdot 0,535} = 202,3 \text{ В.} \quad (161)$$

17.12 Ток якоря двигателя  $I_2$ , А:

$$I_2 = \frac{P_{эм}}{E_2};$$

$$I_2 = \frac{5922}{202,3} = 29,3 \text{ А.} \quad (162)$$

17.13 Уточнённый ток двигателя  $I$ , А:

$$I = I_2 + I_{н.макс};$$

$$I = 29,3 + 1,05 = 30,35 \text{ А.} \quad (163)$$

17.14 Подводимая мощность двигателя  $P_1$ , Вт:

$$P_1 = U \cdot I; \quad (164)$$
$$P_1 = 220 \cdot 30,35 = 6677 \text{ Вт.}$$

17.15 Суммарные потери в двигателе  $P_\Sigma$ , Вт:

$$P_\Sigma = P_1 - P_2; \quad (165)$$
$$P_\Sigma = 6677 - 5500 = 1177 \text{ Вт.}$$

17.16 КПД машины:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}; \quad (166)$$
$$\eta = \frac{1177}{6677} = 0,824.$$

17.17 Уточнённый магнитный поток  $\Phi$ , Вб:

$$\Phi = \frac{30E_2}{\left(\frac{p}{a}\right)^n \cdot \omega_2}; \quad (167)$$
$$\Phi = \frac{30 \cdot 202,3}{\frac{2}{1} \cdot 1500 \cdot 261} = 7,75 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.}$$

17.18 МДС магнитной цепи двигателя:

$$F_\Sigma = 1330 \text{ А.}$$

Определяется по построенной характеристике намагничивания.

17.19 Размагничивающее действие МДС якоря двигателя:

$$F_{p2} = k_{p2} \cdot F_2 = 105 \text{ А.}$$

17.20 МДС последовательной стабилизирующей обмотки двигателя  $F_{noc}$ , А:

$$F_{noc} = \frac{\omega_{noc} \cdot I_2}{a_{noc}}; \quad (168)$$
$$F_{noc} = 5 \cdot 29,3 = 146 \text{ А.}$$

17.21 Необходимая МДС параллельной или независимой обмотки главных полюсов двигателя  $F_n$ , А:

$$F_n = F_\Sigma + F_{p2} - F_{noc}; \quad (169)$$
$$F_n = 1330 + 105 - 146 = 1289 \text{ А.}$$

17.22 Момент вращения на валу двигателя  $M_2$ , Н · м:

$$M_2 = \frac{9,55 \cdot P_2}{n}; \quad (170)$$
$$M_2 = \frac{9,55 \cdot 5500}{1500} = 35,02 \text{ Н · м.}$$



## 18 РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ВВЕРХ

18.1 Магнитный поток при наибольшей частоте вращения  $\Phi_{\min}$ , Вб:

$$\Phi_{\min} = \frac{\Phi_H \cdot n_H}{n_{\max}}; \quad (171)$$

$$\Phi_{\min} = \frac{7,75 \cdot 10^{-3} \cdot 1500}{3000} = 3,87 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.}$$

18.2 МДС при минимальном магнитном потоке:

$$F_{\Sigma \min} = 573 \text{ А.}$$

18.3 Минимальный ток возбуждения  $I_{II \min}$ , А:

$$I_{II \min} = \frac{F_{\Sigma \min}}{\omega_{II}}; \quad (172)$$

$$I_{II \min} = \frac{573}{1400} = 0,409 \text{ А.}$$

18.4 Максимальная величина регулирующего сопротивления  $r_p$ , Ом:

$$r_p = 1,3 \left( \frac{U}{I_{II \min}} - r_{II} \right); \quad (173)$$

$$r_p = 1,3 \left( \frac{220}{0,409} - 151,6 \right) = 502 \text{ Ом.}$$

## 19 РАСЧЕТ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Таблица 2

Данные расчета рабочих характеристик ДПТ

Условные обозначения						
$k$	0,1	0,25	0,5	0,75	1	1,25
$I_2 = k \cdot I_{2H}$ , А	2,930	7,320	14,65	21,97	29,3	36,62
$E_2$ , В	216,4	214,1	210,2	206,3	202,3	198,4
$F_{p2} = k \cdot F_{p2H}$ , А	10,00	26,00	52,00	79,00	105	131,0
$F_{noc} = k \cdot F_{nocH}$ , А	15,00	36,00	73,00	109,0	146	182,0
$F_{\Sigma} = F_n + F_{noc} - F_{p2}$ , А	1294	1299	1310	1319	1330	1340
$\Phi \times 10^{-3}$ , Вб	7,6	7,62	7,65	7,7	7,75	7,76
$n = \frac{30 \cdot E_2}{P_a \cdot \omega_2 \cdot \Phi}$ , об/мин	1636	1615	1579	1540	1500	1469
$I$ , А	3,980	8,37	15,7	23,02	30,35	37,67

Условные обозначения						
$k$	0,1	0,25	0,5	0,75	1	1,25
$P_1$ , Вт	876	1841	3454	5064	6677	8287
$P_{\Sigma M} = E_2 \cdot I_2$ , Вт	634,0	1567	3079	4532	5928	7265
$P_D = k^2 \cdot P_{DH}$ , Вт	1,000	4,00	17,0	38,0	67,0	105,0
$P_2 = P_{\Sigma M} - P_{C\Sigma} - P_{MX\Sigma} - P_D$	272,0	1202	2701	4133	5500	6802
$P_{\Sigma} = P_1 - P_2$ , Вт	598,0	639	753	931	1177	1485
$\eta$ , о.е.	0,320	0,653	0,782	0,816	0,824	0,821
$M_2$ , Н·м	1,590	7,11	16,34	25,63	35,02	44,22

Рабочие характеристики ДПТ приведены на рис. 10-32, а [3].

18.5 Частота вращения при холостом ходе  $n_{\text{омах}}$ . об/мин:

$$n_{\text{омах}} = \frac{30(U-2)}{\left(\frac{p}{a}\right) \Phi_{\min} \cdot \omega_2}; \quad (174)$$

$$n_{\text{омах}} = \frac{30(220-2)}{\frac{2}{1} \cdot 3,87 \cdot 10^{-3} \cdot 261} = 3237 \text{ об/мин.}$$

## 20 РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ВНИЗ

20.1 Допустимый момент вращения на валу при наименьшей частоте вращения двигателя с самовентиляцией  $M_2$ , Н·м:

$$M_2 = \frac{M_2}{M_{\text{НОМ}}} \cdot M_2, \quad (175)$$

где  $\frac{M_2}{M_{\text{НОМ}}} = 0,81$  – коэффициент, определяемый по рис. 10-33, б [3] через

$$K = \frac{n_{\min}}{n_{\text{НОМ}}};$$

$$M_2 = 0,81 \cdot 35,09 = 28,42 \text{ Н·м.}$$

20.2 Магнитный поток при  $n_{\min}$  у двигателя с самовентиляцией  $\Phi$ , Вб:

$$\Phi = \sqrt{\frac{M_2}{M_{2H}}} \cdot \Phi_H; \quad (176)$$

$$\Phi = \sqrt{0,81} \cdot 7,75 \cdot 10^{-3} = 6,97 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.}$$

20.3 Ток якоря при  $n_{\min}$  у двигателя с самовентиляцией  $I_2$ , А:

$$I_2 = \sqrt{\frac{M_2}{M_{2H}}} \cdot I_{2H}; \quad (177)$$

$$I_2 = \sqrt{0,81} \cdot 29,3 = 26,37 \text{ А.}$$

20.4 ЭДС  $E_{2\min}$ , В, при  $n_{\min}$ :

$$E_{2\min} = \frac{\Phi \cdot \frac{p}{a} \cdot n_{\min} \cdot \omega_2}{30}; \quad (178)$$

$$E_{2\min} = \frac{6,97 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 500 \cdot 261}{30} = 60,63 \text{ В.}$$

20.5 Напряжение на якоре  $U_{\min}$ , В, при  $n_{\min}$ :

$$U_{\min} = E_{2\min} + I_2 \cdot m_T r_{2\Sigma} + \Delta U_{\text{щ}}; \quad (179)$$

$$U_{\min} = 60,63 + 26,37 \cdot 0,535 + 2 = 77 \text{ В.}$$

20.6 Результирующая МДС при  $n_{\min}$ :

$$F_{\Sigma\min} = 1090 \text{ А.}$$

20.7 Размагничивающая МДС реакции якоря  $F_{p2}$ , А:

$$F_{p2} = \frac{I_2}{I_{2H}} \cdot F_{p2H}; \quad (180)$$

$$F_{p2} = \sqrt{0,81} \cdot 105 = 94 \text{ А.}$$

20.8 МДС стабилизирующей обмотки  $F_{\text{noc}}$ , А:

$$F_{\text{noc}} = \frac{I_2}{I_{2H}} \cdot F_{\text{noc.H}}; \quad (181)$$

$$F_{\text{noc}} = \sqrt{0,81} \cdot 146 = 131 \text{ А.}$$

20.9 МДС обмотки возбуждения главных полюсов  $F_{II\min}$ , А:

$$F_{II\min} = F_{\Sigma\min} + F_{p2} - F_{\text{noc}}; \quad (182)$$

$$F_{II\min} = 1090 + 94 - 131 = 1053 \text{ А.}$$

20.10 Ток обмотки возбуждения  $I_{II\min}$ , А:

$$I_{II\min} = \frac{F_{II\min}}{\omega_{II}}; \quad (183)$$

$$I_{II\min} = \frac{1053}{1400} = 0,75 \text{ А.}$$

20.11 Максимальная величина регулирующего сопротивления  $r_p$ , Ом:

$$r_p = 1,3 \left( \frac{U_{II}}{I_{\min}} - r_{II} \right); \quad (184)$$

$$r_p = 1,3 \left( \frac{220}{0,75} - 151,6 \right) = 184 \text{ Ом.}$$

## 21 ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ. ПОТЕРИ В ОБМОТКАХ И КОНТАКТАХ ЩЕТОК

21.1 Потери в обмотке якоря  $P'_{M2}$ , Вт:

$$P'_{M2} = I_2^2 \cdot m'_T r_2; \quad (185)$$

$$P'_{M2} = 29,3^2 \cdot 1,48 \cdot 0,24 = 305 \text{ Вт.}$$

21.2 Потери в обмотке добавочных полюсов  $P'_{MД}$ , Вт:

$$P'_{MД} = I_2^2 \cdot m'_T r_{Д}; \quad (186)$$

$$P'_{MД} = 29,3^2 \cdot 1,48 \cdot 0,13 = 165 \text{ Вт.}$$

21.3 Потери в стабилизирующей последовательной обмотке  $P'_{M.нос}$ , Вт:

$$P'_{M.нос} = I_2^2 \cdot m'_T r_{нос}; \quad (187)$$

$$P'_{M.нос} = 29,3^2 \cdot 1,48 \cdot 0,018 = 23 \text{ Вт.}$$

21.4 Потери в параллельной или независимой обмотке главных полюсов  $P_{M.П}$ , Вт:

$$P_{M.П} = U_{П} \cdot I_{П \max}; \quad (188)$$

$$P_{M.П} = 220 \cdot 1,05 = 231 \text{ Вт.}$$

21.5 Потери в контактах щеток  $P_{кщ}$ , Вт:

$$P_{кщ} = \Delta U_{щ} \cdot I_2; \quad (189)$$

$$P_{кщ} = 2 \cdot 29,3 = 59 \text{ Вт.}$$

## 22 ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ. ОБМОТКА ЯКОРЯ

22.1 Условная поверхность охлаждения активной части якоря  $S_{П2}$ , мм<sup>2</sup>:

$$S_{П2} = (\pi D_{H2} + n_{H2} \cdot d_{к2}) l_2; \quad (190)$$

$$S_{П2} = \pi \cdot 160 \cdot 155 = 0,78 \cdot 10^5 \text{ мм}^2.$$

22.2 Условный периметр поперечного сечения овального полузакрытого паза  $П_2$ , мм:

$$П_2 = \pi(r_1 + r_2) + 2h_1; \quad (191)$$

$$П_2 = \pi(4,7 + 2,9) + 2 \cdot 16,6 = 57 \text{ мм.}$$

22.3 Условная поверхность охлаждения пазов  $S_{uП2}$ , мм<sup>2</sup>:

$$S_{uП2} = z_2 \cdot l_2 \cdot П_2; \quad (192)$$

$$S_{uП2} = 29 \cdot 57 \cdot 155 = 2,56 \cdot 10^5 \text{ мм}^2.$$

22.4 Условная поверхность охлаждения лобовых частей обмотки  $S_{Л2}$ , мм<sup>2</sup>:

$$S_{Л2} = 2\pi \cdot D_{H2} \cdot l_{B2}; \quad (193)$$

$$S_{Л2} = 2\pi \cdot 160 \cdot 48,4 = 0,49 \cdot 10^5 \text{ мм}^2.$$

22.5 Условная поверхность охлаждения машины  $S_{\text{маши}}$ , мм<sup>2</sup>:

$$S_{\text{маши}} = \pi D_{H1} \cdot (l_2 + 2l_{B2}); \quad (194)$$

$$S_{\text{маши}} = \pi \cdot 308 \cdot (155 + 2 \cdot 48,4) = 2,44 \cdot 10^5 \text{ мм}^2.$$

22.6 Удельный тепловой поток от потерь в активной части обмотки и от потерь в стали, отнесенных к поверхности охлаждения активной части якоря  $p_{\Pi 2}$ , Вт/мм<sup>2</sup>:

$$p_{\Pi 2} = \frac{P'_{M2} \cdot \frac{2 \cdot l_2}{l_{cp2}} + P_{c\sigma}}{S_{\Pi 2}}; \quad (195)$$

$$p_{\Pi 2} = \frac{305 \cdot \frac{2 \cdot 155}{646} + 117}{0,78 \cdot 10^5} = 338 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/мм}^2.$$

22.7 Удельный тепловой поток от потерь в активной части обмотки, отнесенных к поверхности охлаждения пазов  $p_{u\Pi 2}$ , Вт/мм<sup>2</sup>:

$$p_{u\Pi 2} = \frac{P'_{M2} \cdot \frac{2 \cdot l_2}{l_{cp2}}}{S_{u\Pi 2}}; \quad (196)$$

$$p_{u\Pi 2} = \frac{305 \cdot \frac{2 \cdot 155}{646}}{2,56 \cdot 10^5} = 57 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/мм}^2.$$

22.8 Удельный тепловой поток от потерь в лобовых частях обмотки, отнесенных к поверхности охлаждения лобовых частей обмотки  $p_{Л2}$ , Вт/мм<sup>2</sup>:

$$p_{Л2} = \frac{P'_{M2} \cdot \frac{2 \cdot l_{Л2}}{l_{cp2}}}{S_{uЛ2}}; \quad (197)$$

$$p_{Л2} = \frac{305 \cdot \frac{2 \cdot 168}{646}}{0,49 \cdot 10^5} = 324 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/мм}^2.$$

22.9 Окружная скорость якоря при номинальной частоте вращения  $v_{2H}$ , м/с:

$$v_{2H} = \frac{\pi \cdot D_{H2} \cdot n}{60000}; \quad (198)$$

$$v_{2H} = \frac{\pi \cdot 160 \cdot 1500}{60000} = 12,56 \text{ м/с}.$$

22.10 Превышение температуры поверхности активной части якоря над температурой воздуха внутри машины  $\Delta t_{\Pi 2}$ , °С:

$$\Delta t_{\Pi 2} = \frac{p_{\Pi 2}}{\alpha_2}, \quad (199)$$

где  $\alpha_2 = 8,6 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/мм}^2 \text{ °С}$  – коэффициент теплоотдачи поверхности якоря, определяемый по рис. 10-34 [3];

$$\Delta t_{\Pi 2} = \frac{338 \cdot 10^{-5}}{8,6 \cdot 10^{-5}} = 39,3 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

22.11 Перепад температуры в изоляции паза и проводов  $\Delta t_{u\Pi 2}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ :

$$\Delta t_{u\Pi 2} = p_{u\Pi 2} \left( \frac{b_{u2}}{\lambda_{\text{экв}}} + \frac{r_1 + r_2}{8 \cdot \lambda'_{\text{экв}}} \right), \quad (200)$$

где  $\lambda_{\text{экв}} = 16 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{мм} \cdot ^{\circ}\text{C}}$  – эквивалентный коэффициент теплопроводности изоляции в пазу;

$\lambda'_{\text{экв}} = 120 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{мм} \cdot ^{\circ}\text{C}}$  – эквивалентный коэффициент теплопроводности внутренней изоляции катушек [3, рис. 9-26];

$b_{u2} = 0,5 \text{ мм}$  – односторонняя толщина изоляции в пазу якоря [4];

$$\Delta t_{u\Pi 2} = 57 \cdot 10^{-5} \left( \frac{0,5}{16 \cdot 10^{-5}} + \frac{4,7 + 2,9}{8 \cdot 120 \cdot 10^{-5}} \right) = 2,2 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

22.12 Превышение температуры поверхности лобовых частей обмотки над температурой воздуха внутри машины  $\Delta t_{\text{Л}2}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ :

$$\Delta t_{\text{Л}2} = \frac{P_{\text{Л}2}}{\alpha_2}; \quad (201)$$

$$\Delta t_{\text{Л}2} = \frac{324 \cdot 10^{-5}}{8,6 \cdot 10^{-5}} = 37,7 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

22.13 Перепад температуры в изоляции катушек и проводов лобовых частей обмотки  $\Delta t_{u\text{Л}2}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ :

$$\Delta t_{u\text{Л}2} = p_{\text{Л}2} \left( \frac{b_{u\text{Л}2}}{\lambda_{\text{экв}}} + \frac{h_{\text{Л}2}}{8 \cdot \lambda'_{\text{экв}}} \right); \quad (202)$$

$$\Delta t_{u\text{Л}2} = 324 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{25}{8 \cdot 120 \cdot 10^{-5}} = 8,4 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

22.14 Среднее превышение температуры обмотки над температурой воздуха внутри машины  $\Delta t'_2$ ,  $^{\circ}\text{C}$ :

$$\Delta t'_2 = (\Delta t_{\Pi 2} + \Delta t_{u\Pi 2}) \frac{2l_2}{l_{\text{ср}2}} + (\Delta t_{\text{Л}2} + \Delta t_{u\text{Л}2}) \frac{2l_{\text{Л}2}}{l_{\text{ср}2}}; \quad (203)$$

$$\Delta t'_2 = (39,3 + 2,2) \frac{2 \cdot 155}{646} + (37,7 + 8,4) \frac{2 \cdot 168}{646} = 43,9 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

22.15 Сумма потерь в машине  $P'_{\Sigma}$ , Вт:

$$P'_{\Sigma} = P'_{\text{М}2} + k(P'_{\text{Мд}} + P'_{\text{м.нос}} + P_{\text{М}}) + P_{\text{кц}} + P_{\text{ТЦ}} + 0,1(P_{\text{ТТ}} + P_{\text{вен}}) + P_{\text{С}\Sigma} + P_{\text{Д}}, \quad (204)$$

где  $k = 0,7$  – доля потерь обмоток [5];

$$P'_{\Sigma} = 305 + 0,7(165 + 23 + 231) + 59 + 49 + 0,1 \cdot 189 + 117 + 67 = 909 \text{ Вт}.$$

22.16 Среднее превышение температуры воздуха внутри машины над температурой наружного охлаждающего воздуха  $\Delta t_{\text{В}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ :

$$\Delta t_{\text{В}} = \frac{P'_{\Sigma}}{\alpha_{\text{В}} \cdot S_{\text{маш}}}; \quad (205)$$

где  $\alpha_{\text{В}} = 10,5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}$  – коэффициент подогрева воздуха [3, рис. 10-35];

$$\Delta t_B = \frac{909}{10,5 \cdot 10^{-5} \cdot 2,74 \cdot 10^5} = 35,5 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

22.17 Среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой наружного охлаждающего воздуха  $\Delta t_2$ ,  $^{\circ}\text{C}$ :

$$\begin{aligned} \Delta t_2 &= \Delta t_2' + \Delta t_B; \\ \Delta t_2 &= 43,9 + 35,3 = 79,4 \text{ }^{\circ}\text{C}. \end{aligned} \quad (206)$$

## 23 ТЕПЛОВОЙ РАСЧЁТ. ОБМОТКА ДОБАВОЧНЫХ ПОЛЮСОВ

23.1 Условная поверхность охлаждения многослойных катушек из изолированных проводов  $S_D$ ,  $\text{мм}^2$ :

$$S_D = 2p_D \cdot l_{\text{ср.Д}} \cdot \Pi_D; \quad (207)$$

где  $\Pi_D$  – периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения катушки, мм:

$$\Pi_D = 12 + 0,33D_{H2}; \quad (208)$$

$$\Pi_D = 12 + 0,33D_{H2} = 64,8 \text{ мм};$$

$$S_D = 4 \cdot 404 \cdot 64,8 = 1,05 \cdot 10^5 \text{ мм}^2.$$

23.2 Удельный тепловой поток от потерь в обмотке, отнесенных к поверхности охлаждения обмотки  $p_D$ ,  $\text{Вт/мм}^2$ :

$$p_D = \frac{k \cdot p_{MD}'}{S_D}; \quad (209)$$

$$p_D = \frac{0,7 \cdot 165}{1,05 \cdot 10^5} = 110 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/мм}^2.$$

23.3 Превышение температуры наружной поверхности охлаждения обмотки над температурой воздуха внутри машины  $\Delta t_{PD}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ :

$$\Delta t_{PD} = \frac{p_D}{\alpha_1'}; \quad (210)$$

$$\Delta t_{PD} = \frac{110 \cdot 10^{-5}}{4,55 \cdot 10^{-5}} = 24,2 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

23.4 Перепад температуры в наружной и внутренней изоляции многослойных катушек обмотки из изолированных проводов  $\Delta t_{uД}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ :

$$\Delta t_{uД} = p_D \left( \frac{b_{uД}}{\lambda_{\text{эКв}}} + \frac{b_{кД}}{8 \cdot \lambda_{\text{эКв}}'} \right); \quad (211)$$

где  $b_{uД} = 0,2$  мм – односторонняя толщина наружной изоляции катушки [4];

$$\Delta t_{uД} = 110 \cdot 10^{-5} \left( \frac{0,2}{16 \cdot 10^{-5}} \right) = 1,4 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

23.5 Среднее превышение температуры обмотки над температурой воздуха внутри машины  $\Delta t_{Д}'$ ,  $^{\circ}\text{C}$ :

$$\Delta t_{Д}' = \Delta t_{PD} + \Delta t_{uД}; \quad (212)$$

$$\Delta t'_d = 24,2 + 1,4 = 25,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

23.6 Среднее превышение температуры обмотки над температурой наружного охлаждающего воздуха  $\Delta t_d, ^\circ\text{C}$ :

$$\Delta t_d = \Delta t'_d + \Delta t_B; \quad (213)$$

$$\Delta t_d = 25,6 + 35,5 = 61,1 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

## 24 ТЕПЛОВОЙ РАСЧЁТ. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ОБМОТКА ГЛАВНЫХ ПОЛЮСОВ

24.1 Условная поверхность охлаждения всех катушек  $S_{II}, \text{мм}^2$ :

$$S_{II} = 2p \cdot l_{cp.n} \cdot \Pi_{II}, \quad (214)$$

где  $\Pi_{II}$  – периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения катушки, мм:

$$\Pi_{II} = 37 + 0,14D_{H2}; \quad (215)$$

$$\Pi_{II} = 37 + 0,14D_{H2} = 59,4 \text{ мм};$$

$$S_{II} = 4 \cdot 466 \cdot 59,4 = 1,11 \cdot 10^5 \text{ мм}^2.$$

24.2 Удельный тепловой поток от потерь в обмотке, отнесенных к поверхности охлаждения обмотки  $p_{II}, \text{Вт/мм}^2$ :

$$p_{II} = \frac{k \cdot p_{МП}}{S_{II}}; \quad (216)$$

$$p_{II} = \frac{0,7 \cdot 231}{1,11 \cdot 10^5} = 146 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/мм}^2.$$

24.3 Превышение температуры наружной поверхности охлаждения обмотки над температурой воздуха внутри машины  $\Delta t_{III}, ^\circ\text{C}$  [3]:

$$\Delta t_{III} = \frac{p_{II}}{\alpha_1} \quad (217)$$

где  $\alpha_1 = 4,55 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/мм}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности охлаждения обмотки возбуждения [3, рис. 10-36];

$$\Delta t_{III} = \frac{146 \cdot 10^{-5}}{4,55 \cdot 10^{-5}} = 32,1 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

24.4 Перепад температуры в наружной и внутренней изоляции обмотки  $\Delta t_{uII}, ^\circ\text{C}$ :

$$\Delta t_{uII} = p_{II} \left( \frac{b_{uII}}{\lambda_{эКВ}} + \frac{b_{кП}}{8 \cdot \lambda'_{эКВ}} \right); \quad (218)$$

$$\Delta t_{uII} = 146 \cdot 10^{-5} \left( \frac{0,2}{16 \cdot 10^{-5}} + \frac{19,2}{8 \cdot 98 \cdot 10^{-5}} \right) = 5,3 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

24.5 Среднее превышение температуры обмотки над температурой воздуха внутри машины  $\Delta t'_{II}, ^\circ\text{C}$ :

$$\Delta t'_{II} = \Delta t_{III} + \Delta t_{uII}; \quad (219)$$



$$\Delta t'_d = 32,1 + 5,3 = 37,4 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

24.6 Среднее превышение температуры обмотки над температурой наружного охлаждающего воздуха  $\Delta t_{II}$ ,  $^\circ\text{C}$ :

$$\begin{aligned}\Delta t_{II} &= \Delta t'_{II} + \Delta t_B; \\ \Delta t_{II} &= 37,4 + 35,5 = 72,9 \text{ } ^\circ\text{C}.\end{aligned}\tag{220}$$

## 25 ТЕПЛОВОЙ РАСЧЁТ. КОЛЛЕКТОР

25.1 Условная поверхность охлаждения коллектора  $S_k$ ,  $\text{мм}^2$ :

$$\begin{aligned}S_k &= \pi \cdot D_k \cdot l_k; \\ S_k &= \pi \cdot 125 \cdot 51 = 0,2 \cdot 10^5 \text{ } \text{мм}^2.\end{aligned}\tag{221}$$

25.2 Удельный тепловой поток от потерь на коллекторе, отнесенных к поверхности охлаждения коллектора  $p_k$ ,  $\text{Вт/мм}^2$ :

$$\begin{aligned}p_k &= \frac{P_{\text{кш}} + P_{\text{тш}}}{S_k}; \\ p_k &= \frac{59 + 49}{0,2 \cdot 10^5} = 540 \cdot 10^{-5} \text{ } \text{Вт/мм}^2.\end{aligned}\tag{222}$$

25.3 Превышение температуры коллектора над температурой воздуха внутри машины  $\Delta t'_k$ ,  $^\circ\text{C}$ :

$$\Delta t'_k = \frac{p_k}{\alpha_k},\tag{223}$$

где  $\alpha_k = 18 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$  – коэффициент теплоотдачи поверхности коллектора [3, рис. 10-37];

$$\Delta t'_k = \frac{540 \cdot 10^{-5}}{18 \cdot 10^{-5}} = 30 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

25.4 Превышение температуры коллектора над температурой наружного охлаждающего воздуха  $\Delta t_k$ ,  $^\circ\text{C}$ :

$$\begin{aligned}\Delta t_k &= \Delta t'_k + \Delta t_B; \\ \Delta t_k &= 30 + 35,5 = 65,5 \text{ } ^\circ\text{C}.\end{aligned}\tag{224}$$

## 26 ВЕНТИЛЯЦИОННЫЙ РАСЧЕТ

26.1 Необходимый расход воздуха  $V_B$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ :

$$V_B = \frac{k_2 \cdot P'_\Sigma}{C_B \cdot \Delta t_B},\tag{225}$$

где  $k_2$  – коэффициент, учитывающий изменение теплоотдачи по длине корпуса машины:

$$k_2 = 2,2 \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{n}{1000}\right)^3} \cdot \sqrt{\frac{D_{корн}}{100}}; \quad (226)$$

$$k_2 = 2,2 \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{n}{1000}\right)^3} \cdot \sqrt{\frac{D_{корн}}{100}} = 5,21;$$

$C_B = 1100 \frac{\text{Дж}}{\text{°C} \cdot \text{м}^3}$  – теплоемкость воздуха [5];

$$V_B = \frac{5,21 \cdot 1177}{1100 \cdot 35,5} = 0,157 \text{ м}^3/\text{с}.$$

26.2 Расход воздуха  $V'_B$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ :

$$V'_B = 0,6 \cdot \left(\frac{n_1}{1000}\right) \cdot \left(\frac{D_{корн}}{100}\right)^3 \cdot 10^{-2}; \quad (227)$$

$$V'_B = 0,6 \cdot \left(\frac{1500}{1000}\right) \cdot \left(\frac{308}{100}\right)^3 \cdot 10^{-2} = 0,263 \text{ м}^3/\text{с}.$$

При проверке  $V'_{B_1} > V_B$ .

26.3 Напор воздуха  $H$ , Па:

$$H = 0,6 \cdot \left(\frac{n_1}{1000}\right)^2 \cdot \left(\frac{D_{корн}}{100}\right)^2; \quad (228)$$

$$H = 12,3 \cdot \left(\frac{1500}{1000}\right)^2 \cdot \left(\frac{308}{100}\right)^2 = 363 \text{ Па}.$$

### Библиографический список

1 **Вольдек, А.И.** Электрические машины. Машины постоянного тока. Введение в специальность : учебник для вузов / А.И. Вольдек, В.В. Попов. – СПб. : Питер, 2007. – 350 с.

2 **Грищенко, А.В.** Новые электрические машины локомотивов : учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / А.В. Грищенко, Е.В. Козаченко. – М. : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на ж.-д. трансп.», 2008. – 271 с.

3 **Гольдберг, О.Д.** Проектирование электрических машин : учебник / О.Д. Гольдберг, И.С. Свириденко ; под ред. О.Д. Гольдберга. – 3-е изд., перераб. – М. : Высш. шк., 2006. – 430 с.

4 Проектирование электрических машин : учеб. для вузов / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев ; под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2005. – 767 с.

5 **Гольдберг, О.Д.** Инженерное проектирование и САПР электрических машин : учебник / О.Д. Гольдберг, И.С. Свириденко ; под ред. О.Д. Гольдберга. – М. : Академия, 2008. – 560 с.

## Оглавление

Введение .....	3
1 Главные размеры .....	4
2 Сердечник якоря .....	5
3 Сердечник главных полюсов .....	6
4 Сердечники добавочных полюсов .....	7
5 Станина .....	8
6 Тип и шаги обмотки якоря. Количество витков обмотки, коллекторных пластин, пазов .....	9
7 Обмотка якоря с овальными полузакрытыми пазами .....	12
8 Обмотка добавочных полюсов .....	15
9 Стабилизирующая последовательная обмотка главных полюсов .....	17
10 Характеристика намагничивания машины .....	18
11 Параллельная обмотка главных полюсов .....	22
12 Размещение параллельной обмотки главных полюсов .....	25
13 Размещение стабилизирующей последовательной обмотки .....	25
14 Размещение обмотки добавочных полюсов .....	25
15 Щетки и коллектор .....	26
16 Коммутационные параметры .....	27
17 Номинальный режим .....	30
18 Регулирование частоты вращения вверх .....	33
19 Расчет рабочих характеристик .....	33
20 Регулирование частоты вращения вниз .....	34
21 Тепловой расчет. Потери в обмотках и контактах щеток .....	36
22 Тепловой расчет. Обмотка якоря .....	36
23 Тепловой расчёт. Обмотка добавочных полюсов .....	39
24 Тепловой расчёт. Параллельная обмотка главных полюсов .....	40
25 Тепловой расчёт. Коллектор .....	41
26 Вентиляционный расчет .....	41
Библиографический список .....	42

*Учебное издание*

**Трубицина Надежда Анатольевна**

**РАСЧЕТ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Учебное пособие

Редактор Л.И. Сергейчик  
Корректор Л.И. Сергейчик

Подписано в печать. 21.12.2012. Формат 60×84/16.  
Бумага газетная. Ризография. Усл. печ. л. 2,56.  
Уч.-изд. л. 2,3. Тираж экз. Изд. № 43. Заказ №

Ризография ФГБОУ ВПО РГУПС.

---

Адрес университета:  
344038, Ростов н/Д, пл. им. Ростовского Стрелкового Полка  
Народного Ополчения, 2.